www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Jaargang 20, 1958, no. 1 blz. 1-28 Verschenen 24 april 1958

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

DE „TL" DUBBELFLUXLAMP, EEN LAMP MET GROOT VERMOGEN PER LENGTE-EENHEID

door H. J. J. van BOORT en D. KOLKMAN. 621.327.534.15

Door een niet zeer ingrijpende wijziging van de constructie is het gelukt „TL" lampen te maken die bij dezelfde afmetingen als normale „TL" lampen ongeveer de dubbele lichtstroom geven, bij een behoorlijk rendement. Voor allerlei gevallen, zoals verlichting van industriehallen, sporthallen, enz., zal men met deze nieuwe lampen tot nog economischer installaties kunnen komen.

Hoewel de toepassingsgebieden van gloeilampen en van buisvormige fluorescentielampen („TL" lampen) langzamerhand vrij duidelijk zijn afgepaald, zodat van een vreedzame coëxistentie kan worden gesproken, wordt men zich nu en dan toch wel eens bewust van waardevolle eigenschappen van de gloeilamp die men bij het overgaan tot fluorescentieverlichting heeft moeten prijsgeven. Een dezer eigenschappen is de concentratie van een groot vermogen in een relatief kleine en gemakkelijk hanteerbare lamp. Gloeilampen tot 1500 watt, die in aanmerking komen voor de verlichting b.v. van pleinen, worden nog tot de „normale" lampen gerekend, d.w.z. tot de lampen die noch in de fabricage noch in het gebruik (bij aansluiting, onderhoud en vervanging) speciale methodes en procedures eisen. Veel grotere gloeilampen, tot 10 kW of zelfs meer, worden regelmatig gefabriceerd en zijn nog redelijk goed te hanteren. Stel daartegenover de fluorescentielamp: deze heeft zijn zegetocht door de wereld gemaakt hoofdzakelijk in slechts één enkele uitvoering, met een vermogen van ca. 40 W en een lengte van ongeveer 1,20 m. Aanzienlijk grotere vermogens schenen (althans tot voor kort) in een lamp van deze lengte moeilijk te realiseren, als men niet het hoge lichtrendement van de fluorescentielamp grotendeels wilde opofferen.

Men heeft zich bij deze beperking niet neergelegd. Voor industriële en voor straatverlichtingsinstallaties met grote verlichtingssterkten — waarvoor het fluorescentielicht zich krachtens kleur en rendement juist bij uitstek leent — is het van groot belang de lichtstroom per lamp op te voeren: hoe minder lampen men nodig heeft, des te minder kosten van armaturen en voorschakelapparaten, en des te gemakkelijker het onderhoud. De min of meer triviale maatregel om de lampen langer te maken, bij ongeveer hetzelfde vermogen per lengte-eenheid, is daarbij slechts een schijnoplossing. De armaturen zijn dan wel minder in aantal, maar ook duurder, en hetzelfde geldt voor de voorschakelapparaten wegens de met de lengte van de lamp toenemende ontsteekspanning. Daarbij komt nog dat het vervangen van zeer lange lampen, zoals b.v. een 125 W-lamp met een lengte van 2,40 m, in een installatie voor industriële of straatverlichting niet bepaald eenvoudig is.

Op verschillende wijzen is de lampenindustrie er thans in geslaagd, fluorescentielampen van groter vermogen te ontwikkelen met behoud van een redelijke lengte, en met behoud van een hoog lichtrendement. Om de maatregelen die men hiertoe genomen heeft begrijpelijk te maken, is een nadere beschouwing nodig van de factoren die het rendement van de fluorescentielamp bepalen.

Rendement en dimensionering van buisvormige fluorescentielampen

Het proces waarom het in deze lamp gaat, is de uitzending van ultraviolette stralingsquanta, in hoofdzaak met golflengte 2537 Å, door aangeslagen kwikatomen, en de absorptie van deze quanta door de fluorescerende poederlaag op de buiswand. Hoe meer kwikatomen er aanwezig zijn, d.w.z. hoe groter de kwikdampdruk in de buis is, en hoe groter de stroomdichtheid van de elektrische ontlading, des te meer kwikatomen zullen door de in het elektrische veld versnelde elektronen worden aangeslagen (het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

primaire proces). Tevens echter worden twee secundaire verschijnselen steeds merkbaarder die het rendement benadelen: de zelfabsorptie, d.i. de absorptie van de stralingsquanta door niet-aangeslagen kwikatomen, en de aanslag van reeds aangeslagen kwikatomen tot nog hogere energieniveaus. In beide gevallen kan weliswaar opnieuw een stralingsquantum van 2537 Å worden uitgezonden, maar de concurrerende processen: uitzending van quanta met grotere of kleinere golflengte, die voor het opwekken van fluorescentie niet geschikt zijn, en dissipatie van aanslagenergie als warmte, krijgen door het inschakelen van de tussentrappen betere kansen [1]). Vooral de nadelige invloed van een verhoging van de kwikdampdruk blijkt zeer sterk te zijn. Anderzijds is natuurlijk een zekere hoeveelheid kwikdamp nodig voor het primaire proces. Men vindt derhalve een optimaal lichtrendement bij een bepaalde kwikdampdruk, en wel bij ca. 5×10^{-3} mm Hg. Dit is de verzadigingsdampdruk van kwik bij een temperatuur van ongeveer 40 °C.

De „TL" lampen (die men van een geringe overmaat vloeibaar kwik voorziet) zijn dan ook steeds zodanig geconstrueerd dat tijdens het branden onder normale omstandigheden de buiswand een temperatuur van ca. 40 °C aanneemt. De buiswand, zijnde het koudste gedeelte van de lamp, bepaalt immers in de stationaire toestand de druk van de kwikdamp (beginsel van Watt). Bij de normale „TL" lampen krijgt de buiswand vrijwel langs de gehele ontladingszuil de genoemde temperatuur; de wand nabij de elektrodes wordt in het algemeen warmer.

Door het voorschrijven van de wandtemperatuur van de ontladingszuil wordt een zeker verband gelegd tussen het vermogen dat men in de ontladingszuil wil ontwikkelen en de afmetingen die de lamp zal moeten krijgen. Bij een bepaalde omgevingstemperatuur — men stelt deze gewoonlijk op 25 °C [2]) — en bij een gegeven wandtemperatuur kan men nl. de warmtehoeveelheid q die per oppervlakte-eenheid van de wand en per tijdseenheid door straling en convectie wordt afgevoerd, als gegeven beschouwen. In werkelijkheid hangt q nog wel enigszins van de diameter d van de buis af (met toenemende d wordt q kleiner), maar in eerste instantie mogen we daarvan afzien. Wil men de zuil belasten met een vermogen P, dan heeft men dus een wandoppervlakte $A = P/q$ nodig.

Stel nu dat men het vermogen dat in de zuil van een lamp wordt ontwikkeld, wil opvoeren tot b.v. de dubbele waarde. De oppervlakte van de wand moet dan ongeveer twee maal zo groot worden gemaakt.

De eenvoudigste mogelijkheid daartoe is de reeds aangestipte, dat men de zuil tweemaal zo lang maakt bij gelijke diameter. Dit komt ongeveer erop neer dat men twee van de oorspronkelijke lampen aan elkaar zet. Dat dit geen goede oplossing is, hebben we ook reeds gezegd: de lamp wordt ongewenst lang, en ook de spanning V_z over de zuil wordt ongewenst groot, nl. twee maal de oorspronkelijke waarde. Het is doelmatig een lamp te construeren voor een brandspanning (d.i. boogspanning V_z + het spanningsverlies aan de elektrodes, dat bij de „TL" lampen ca. 15 V bedraagt) gelijk aan ongeveer de helft van de effectieve waarde van de netspanning (of nauwkeuriger: van de open spanning van het voorschakelapparaat). Een hogere brandspanning is niet gunstig, omdat dan de lamp te veel invloed van netspanningsschommelingen ondervindt. Men kan dit weliswaar ondervangen door de netspanning omhoog te transformeren, maar komt dan tot een duurder voorschakelapparaat.

De tegenovergestelde manier om de dubbele wandoppervlakte te krijgen, zou zijn, dat men de oorspronkelijke lengte van de zuil aanhoudt maar de diameter tweemaal zo groot maakt. Voor de hanteerbaarheid van de lamp zou dit een goede oplossing zijn, maar wat betreft het totale rendement zou men hiermee de plank geheel mis slaan. Bij zulk een diameter komt men nl. tot een heel lage boogspanning en een zeer grote stroom (de gradiënt van de zuilontlading neemt af met toenemende diameter en met toenemende stroom, zie hieronder). Bij een zeer lage boogspanning wordt de invloed van het constante spanningsverlies van 15 V aan de elektrodes zo schadelijk voor het totale rendement, dat we er niet veel aan zouden hebben dat we de juiste wandtemperatuur en daarmee de optimale kwikdampdruk hebben gehandhaafd. Bovendien maken de grote stroom en lage spanning wederom het voorschakelapparaat relatief duur.

Als compromis tussen de beide extreme mogelijkheden (constante diameter d resp. constante lengte l) ligt het voor de hand, de verdubbeling van de wandoppervlakte $A = \pi dl$ te realiseren bij een onveranderde brandspanning. Men zal dan zowel de lengte als de diameter groter moeten kiezen dan de oorspronkelijke. De vereiste waarden kan men bij benadering vinden met behulp van een grafiek die de, door metingen bepaalde, gradiënt van de lagedrukkwikontlading geeft als functie van de diameter, bij verschillende waarden van de stroom; zie *fig. 1*. De

---

[1]) Zie b.v. G. Heller, Vergelijking van de ontladingsvorm in natrium- en kwikdamplampen, Philips techn. T. **1**, 2-5 en 70-75, 1936.

[2]) Deze onderstelling houdt verband met de internationale overeenkomst, de lichtstroom en dus ook het lichtrendement van fluorescentielampen steeds bij een omgevingstemperatuur van 25 °C te meten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

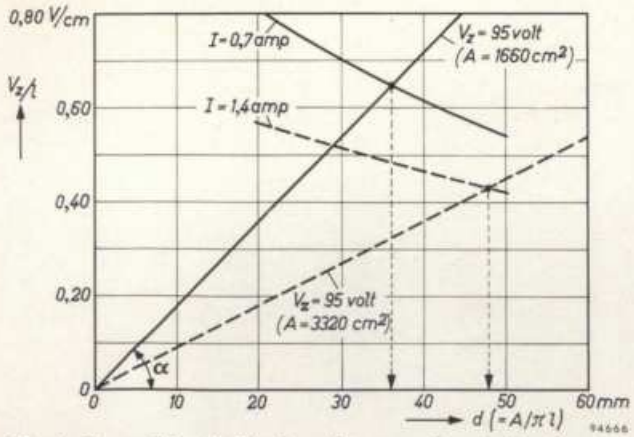


Fig. 1. De gradiënt V_z/l in de zuil van een lagedrukkwikontlading, als functie van de inwendige diameter d, voor verschillende stroomsterkten I (bij een argonvulling met een druk van 1,5 mm Hg).

Bij een voorgeschreven vermogen P van de zuil kan men, als men uitgaat van een bepaalde wandtemperatuur, de wandoppervlakte A globaal als gegeven beschouwen, zodat de abscisschaal voor d ($= A/\pi l$) tevens een reciproke schaal van de zuillengte l voorstelt. Op een rechte door de oorsprong heeft dan de spanning V_z een constante waarde, en men vindt de vereiste d (en dus l) voor gegeven P en V_z door de bij de stroom I behorende kromme te snijden met de bij V_z behorende rechte.

Bij een grotere stroom, die beantwoordt aan een groter vermogen P, ligt de kromme voor de gradiënt lager (gestippeld) en tevens loopt de rechte voor de oorspronkelijke waarde van V_z nu vlakker. (De richtingscoëfficiënt van deze rechte is nl. $\operatorname{tg}\alpha = \pi V_z/A$ en is dus bij constante V_z kleiner voor de grotere oppervlakte A, welke bij de grotere waarde van P behoort.) Het nieuwe snijpunt blijkt te liggen bij grotere diameter en lengte, globaal evenredig met de wortel uit het vermogen.

procedure is in het bijschrift toegelicht. Het resultaat is een ongeveer gelijkvormige vergroting van de oorspronkelijke lamp: zowel de lengte als de diameter moet voor een verdubbeling van het vermogen ongeveer een factor $\sqrt{2}$ worden vergroot, zie *fig. 2*.

Een getallenvoorbeeld moge het bovenstaande illustreren. De reeds sinds een aantal jaren gefabriceerde „TL" 65 W lamp heeft een brandspanning van 110 V, dus een spanning $V_z = 110 - 15 = 95$ V over de zuil; het vermogen in de zuil is rond 55 W. De inwendige diameter van de lamp is 35 mm, de lengte

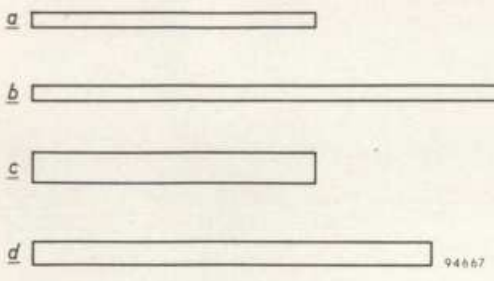


Fig. 2. Uitgaande van een buisvormige fluorescentielamp met bepaald vermogen, kan men op verschillende wijzen een lamp met het dubbele vermogen realiseren:
a) Oorspronkelijke lamp.
b) Lamp met dezelfde diameter en de dubbele lengte als (*a*); ook de boogspanning wordt 2× zo groot.
c) Lamp met dezelfde lengte als (*a*) maar de dubbele diameter; de boogspanning wordt zeer laag.
d) Lamp met dezelfde boogspanning als (*a*); lengte en diameter zijn beide vergroot, de lamp is ongeveer gelijkvormig met (*a*).

rond 1,50 m; voor de elektroderuimten en de overgangszones tussen zuil en elektrodes moet men ca. 10 cm rekenen, zodat de zuil ca. 1,40 m lang is. Een verdubbeling van het vermogen in de zuil, tot 110 W, zou volgens fig. 1 leiden tot een lamp met een zuillengte van ca. 2,20 m en een inwendige diameter van 48 mm.

Natuurlijk blijkt uit het bovenstaande nog niet, hoe ernstig het is als men van de voor l en d afgeleide waarden afwijkt, d.w.z. hoe sterk het lichtrendement van de lamp zal afwijken van de maximale waarde, indien men een andere wandtemperatuur zich laat instellen dan de optimale van 40 °C. Een afleiding hiervan zou hier te ver voeren, vooral omdat we in aanmerking moeten nemen dat dit rendement niet afhangt van de kwikdampdruk alléén. De invloed van de stroomdichtheid hebben we reeds

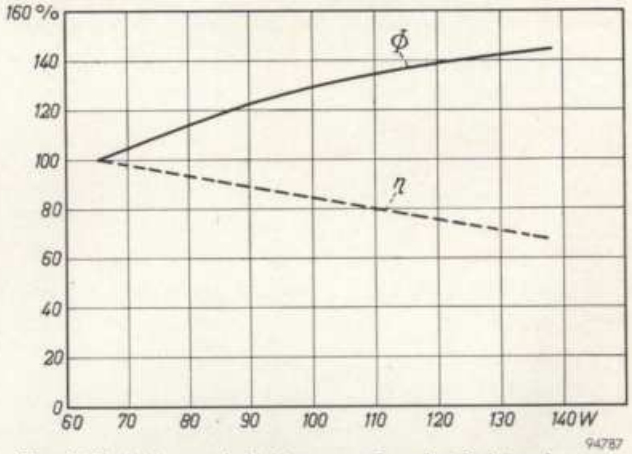


Fig. 3. Variatie van de lichtstroom Φ en het lichtrendement η (beide uitgezet in % van de nominale waarden) van een bepaalde „TL" 65 W lamp, wanneer hierin verschillende vermogens P worden ontwikkeld. De lamp brandde natuurlijk niet op het normale voorschakelapparaat, maar had een speciale voeding. (De lamp verschilde van de normale „TL" 65 W lampen alleen door de iets zwaardere elektrodes, die voor deze proef waren aangebracht om de grotere stroom te kunnen verduren.)

genoemd; andere factoren zijn de druk van het edelgas, dat o.a. ter ontsteking van de lamp dient, de weglengte van de stralingsquanta uit het inwendige van de zuil naar de wand, de recombinatie der ionen en elektronen aan de wand, enz. Het eenvoudigst kunnen we daarom de scherpte van het criterium van de juiste wandtemperatuur, of nog beter: van de juiste specifieke belasting, demonstreren door een experiment. We hebben daartoe het lichtrendement van een bepaalde normale „TL" lamp gemeten als functie van de belasting; zie *fig. 3*. Men ziet dat een vergroting van het vermogen tot het dubbele van de nominale waarde een toeneming van de lichtstroom met slechts 40% levert. Het lichtrendement van de lamp daalt derhalve met 30%. Een merkbare vermindering van het lichtrendement (nl. met 5%) krijgt men reeds als het vermogen slechts ongeveer 16% groter dan nominaal is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fluorescentielampen voor groter vermogen per lengte-eenheid

De bovenstaande beschouwing leidde tot de conclusie dat voor een groter vermogen een grotere buislengte van de fluorescentielamp noodzakelijk zou zijn. Bij nader inzien is dit echter te wijten aan de stilzwijgend gemaakte onderstelling dat de temperatuur die de kwikdampdruk in de buis bepaalt (de temperatuur van de koudste plek van de buis), dezelfde is als die welke de warmteafvoer per cm² van de wand bepaalt (een soort gemiddelde temperatuur van de wand). Uit deze opmerking blijkt reeds, welke kant men uit moet om in een fluorescentielamp grotere vermogens te kunnen ontwikkelen zonder noemenswaardige vergroting van de lengte: men moet door wijziging van de constructie van de lamp trachten ervoor te zorgen *dat er, bij een hogere gemiddelde wandtemperatuur, toch minstens één plaats aanwezig is waar de wand op ca. 40 °C komt.*

We bespreken hier drie constructies van fluorescentielampen waarmee men dit heeft gerealiseerd: de „Power Groove" lampen van General Electric, U.S.A., de „V.H.O." (very high output) lampen van Sylvania, en de door Philips ontwikkelde „TL" dubbelfluxlampen.

Bij de „Power Groove" lampen [3]) is men uitgegaan van een buis met een diameter van 53 mm, waarvan men de doorsnede heeft vervormd tot de in *fig. 4* getekende niervorm. Aangezien een over de gehele lengte van de lamp aangebrachte groef de mechanische sterkte zou verminderen, waardoor het gevaar van implosie zou toenemen, is de lamp aan de uiteinden en op enkele equidistante tussengelegen plaatsen over een zekere lengte cilindrisch gehouden. De ontlading concentreert zich voornamelijk in het geschaduwde gedeelte van de doorsnede. De laagste punten van de doorsnede (de lamp wordt geacht in de in fig. 4 getekende stand te branden) blijven relatief koel. Bij een lengte van 1,20 m kan zulk een lamp met 107 W worden belast (stroom 1,5 A bij een spanning van 84 V) en heeft dan, na 100 uren brandtijd gemeten, een lichtrendement van 56 lm/W.

De „V.H.O." lampen [4]) hebben een normale buisdoorsnede, met een diameter van 38 mm, maar bij een gegeven totale lengte van 1,20 m is de afstand der elektrodes kleiner gemaakt dan normaal. Achter elke elektrode is aldus een ruimte van ca. 6 cm lengte ontstaan waarin geen ontlading aanwezig is

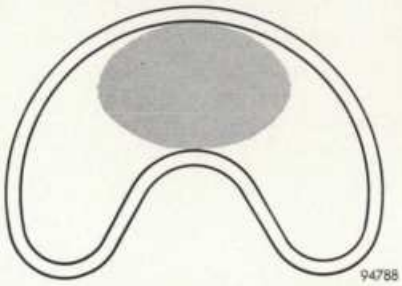


Fig. 4. Doorsnede van de „Power Groove" lamp (General Electric [3])). De ontlading concentreert zich min of meer in het geschaduwde gedeelte, in de laagste punten van de doorsnede blijft de wand op lagere temperatuur.

(*fig. 5*). Deze ruimte is bovendien, ter afscherming van de stralingswarmte van de elektrode, door een metalen plaatje min of meer gescheiden van de ontladingsruimte. Zodoende heeft men bereikt dat aan de einden van de buis de wandtemperatuur ca. 40 °C bedraagt, bij een belasting van 100 W. Als ontsteekgas is hier neon gebruikt in plaats van het gebruikelijke argon. Stroom en brandspanning bedragen bij deze lamp 1,2 A, 99 V.

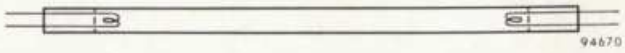


Fig. 5. Schematische voorstelling van de „Very High Output" lampen (Sylvania [4])). Hier blijven de achter de elektrodes gelegen gedeelten van de buis, die langer zijn dan normaal en die tegen warmtestraling van de elektrodes zijn afgeschermd, op een temperatuur van 40 °C.

Het door Philips ontwikkelde nieuwe type „TL" lamp voor groot vermogen per lengte-eenheid, de „TL" dubbelfluxlamp, is in *fig. 6* en *7* afgebeeld. Bij deze lamp is weer van de normale cilindrische buisvorm uitgegaan, maar op de halve lengte van de buis is nu een uitstulping aangebracht, zodanig dat de temperatuur aan de onderzijde hiervan ca. 40 °C bedraagt, terwijl de buiswand elders veel warmer wordt. In een bepaalde uitvoering volgens dit principe geven we de lamp een lengte van 1,50 m, d.i. dezelfde lengte als die van de „TL" 65 W lamp, en een diameter van 35 mm. Indien de uitstulping een diameter van 10 mm en een diepte van 10 mm heeft, kan de buis worden belast met 125 W, d.i. dezelfde belasting per lengte-eenheid als de twee hierboven besproken Amerikaanse types. De lampstroom bedraagt dan 1,5 A, de brandspanning 97 V, het lichtrendement na 100 uur is 57 lm/W. De lamp geeft dus per lengte-eenheid een 1,7× zo grote lichtstroom als de „TL" 65 W lamp, die een

[3]) J. O. Aicher en E. Lemmers, Design and characteristics of fluorescent lamps having a non-circular cross section, Illum. Engng. **52**, 579-584, 1957 (no. 11).
G. R. Baumgartner, R. T. Dorsey en E. A. Linsday, Application of non-circular cross-section fluorescent lamps, Illum. Engng. **52**, 587-596, 1957 (no. 11).

[4]) J. F. Waymouth, W. Calvin Gungle, Ch. W. Jerome en F. Bitter, Very-high-output fluorescent lamps, Sylvania Technologist **9**, 102-110, 1956.
J. F. Waymouth, F. Bitter en E. F. Lowry, Factors to be considered in the design of high-output fluorescent lamps, Illum. Engng. **52**, 257-261, 1957 (no. 5).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

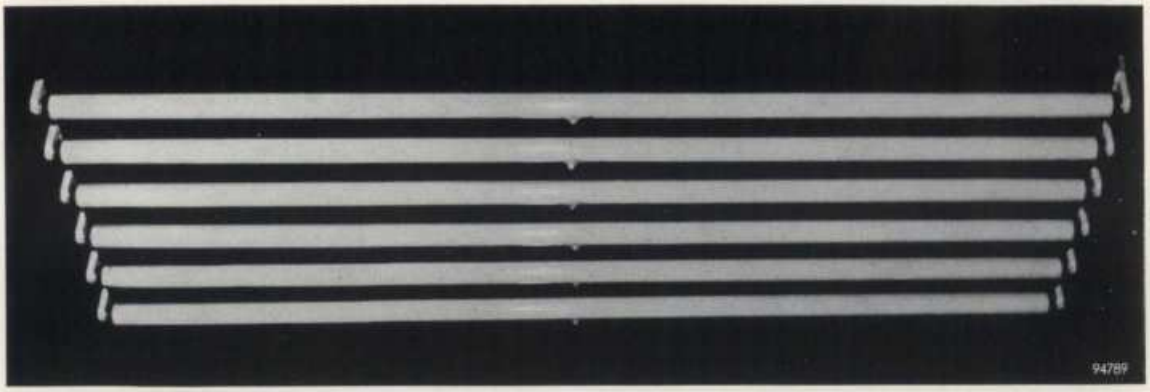


Fig. 6. Een reeks „TL" dubbelfluxlampen.

rendement van 64 lm/W heeft, en een 2,2× zo grote lichtstroom als de „TL" 40 W lamp, waarvan het rendement 66 lm/W bedraagt. De buiswand neemt (behalve in de uitstulping en nabij de elektrodes) een temperatuur van 57 °C aan, bij een omgevingstemperatuur van 25 °C. Dat het lichtrendement iets lager uitvalt dan bij de „TL" 65 W lamp, hoewel men de optimale kwikdampdruk

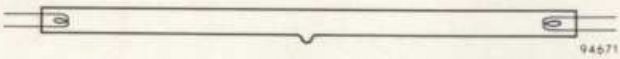


Fig. 7. Schematische voorstelling van de door Philips geconstrueerde „TL" 125 W dubbelfluxlamp, die een lengte van 1,50 m heeft (zelfde lengte als de „TL" 65 W). Halverwege de buis is aan de onderkant een ca. 10 mm diepe uitstulping van 10 mm diameter aangebracht. Hier komt de wand op 40 °C, zodat de kwikdampdruk in de buis (nadat al het overtollige kwik hier is gecondenseerd) zich weer op de optimale waarde instelt.

handhaaft, is grotendeels toe te schrijven aan de grotere stroomdichtheid, die het optreden van kwikatomen in hogere aangeslagen toestanden bevordert.

De beschreven constructie met het grotere vermogen per lengte-eenheid kan worden toegepast om lampen van uiteenlopend vermogen (en dus lengte) te maken. De genoemde uitvoering, met een lengte van 1,50 m, is gekozen om tot een relatief hoge brandspanning te komen. Een vulling met neon in plaats van argon als ontsteekgas heeft eveneens een hogere brandspanning ten gevolge, doch bleek ons minder gewenst, daar de elektrodes dan sneller verstuiven, met als gevolg een kortere levensduur van de lamp. Met het oog op het verstuiven hebben we ook, hoewel het optimale rendement bij een argondruk van ca. 1 mm Hg optreedt, de argondruk hoger gekozen, nl. 1,5 mm Hg.

Het aanbrengen van de „koude plek" op de halve lengte van de lamp heeft het voordeel dat men daar geen hinder ondervindt van de hoge temperatuur in de omgeving van de elektrodes. De genoemde kleine uitstulping levert daardoor reeds het gewenste effect. De constructie heeft tevens de goede eigenschap dat de lamp over de volle lengte licht geeft, terwijl ook geen helderheidsvariaties langs de buis optreden. De beschreven uitstulping kan eenvoudig worden aangebracht nadat de buis van zijn fluorescerende laag is voorzien. Moeilijkheden met het aanbrengen van deze laag worden dus vermeden.

Na het vullen van de lamp met edelgas en kwik en na het afsmelten van de pomp is het vloeibare kwik willekeurig in de lamp verdeeld. Is de lamp naar de plaats van gebruik getransporteerd en wordt hij nu voor het eerst ontstoken, dan brandt hij een tijdlang met te lage spanning, daar de kwikdampdruk te hoog is (er bevindt zich vloeibaar kwik op te hete plekken). Eerst na een zekere brandtijd, als al het overtollige kwik naar de uitstulping is gedestilleerd, verkrijgt men de juiste kwikdampdruk, neemt de brandspanning de vereiste waarde aan en geeft de lamp zijn maximale lichtstroom. De tijd, nodig voor deze stabilisatie, verschilt van lamp tot lamp, daar de beginverdeling van het kwik sterk kan uiteenlopen.

Na afloop van deze stabilisatieperiode zal het vloeibare kwik in de uitstulping blijven liggen, zodat vrijwel dadelijk na het opnieuw inschakelen de maximale lichtstroom wordt verkregen. Uiteraard kunnen de lampen alleen branden in een horizontale positie, met de uitstulping naar beneden.

Samenvatting. Buisvormige fluorescentielampen („TL" lampen) hebben het hoogste lichtrendement bij een kwikdampdruk van ongeveer 5×10^{-3} mm Hg. Bij de normale lampen wordt deze druk verkregen doordat de temperatuur van de buiswand zich instelt op een waarde van ca. 40 °C. Men kan aantonen dat onder deze voorwaarde en bij gegeven brandspanning een vergroting van het vermogen slechts mogelijk is als men de lamp langer maakt. Om aan deze noodzaak te ontkomen, heeft men fluorescentielampen ontwikkeld waarbij het grootste gedeelte van de wand een hogere temperatuur kan aannemen terwijl een klein gedeelte juist op een temperatuur van 40 °C komt; de kwikdampdruk blijft dan optimaal. De door Philips volgens deze gedachte geconstrueerde „TL" dubbelfluxlamp, die gekenmerkt is door een ca. 10 mm diepe uitstulping van 10 mm diameter op de halve lengte van de buis, heeft een vermogen van 125 W bij een lengte van 1,50 m, d.i. dezelfde lengte als de normale „TL" 65 W lamp. De lichtrendementen van deze beide lampen, na 100 uur branden, zijn resp. 57 lm/W en 64 lm/W.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET AANEENSMELTEN VAN VENSTER EN CONUS VAN TELEVISIEWEERGEEFBUIZEN

door A. H. EDENS.

666.1.037.4:621.385.832:621.397.62

Het artikel geeft een kijk op enkele van de problemen die zich voordoen bij het machinaal verwerken van zware (en niet rotatiesymmetrische) glazen delen in een massafabricage.

Dunwandige glazen delen smelt men in het algemeen aaneen door ze te verhitten met een aantal vlammen die ten naaste bij evenwijdig zijn gericht met de kopvlakken van de aaneen te smelten randen (*fig. 1a*). Men duwt de hete randen tegen elkaar en krijgt dan een las zoals geschetst is in fig. 1*b*. Door de oorspronkelijke glazen delen onmiddellijk weer iets uiteen te trekken en door eventueel uit- en inwendig rollen van de laszone, kan men verkrijgen dat deze zone zich, wat wanddikte betreft, weinig onderscheidt van de rest van het glazen voorwerp (fig. 1*c*). Een geval waarin een dergelijke methode wordt toegepast, nl. het aaneensmelten van venster en conus van een speciale katodestraalbuis, is kort geleden in dit tijdschrift behandeld [1]).

Tracht men op dezelfde wijze dikwandige delen aaneen te smelten, zoals venster en conus van de ballon van een glazen televisieweergeefbuis (wanddikte 5 tot 6 mm of nog meer), dan krijgt men geen bevredigende las. De versmelting vindt dan nl. niet meer over het gehele kopvlak van de randen plaats, daar bij het verhitten de temperatuur van de randen in radiale richting (de richting van de vlammen) een gradiënt vertoont: heeft men aan de buitenzijde van de ballon de juiste temperatuur, dan is aan de binnenzijde de temperatuur te laag, zodat hier de oppervlakspanning van het glas het niet kan winnen van de te grote viscositeit. Men krijgt daardoor aan de binnenzijde een scherpe overgang (fig. 1*d*). Deze is vooral ongewenst indien de laszone naderhand wordt onderworpen aan zware mechanische belasting, zoals bij een geëvacueerde weergeefbuis het geval is.

De beschreven moeilijkheid wordt in Eindhoven omzeild door het gebruik van een lasmethode waarbij de te versmelten randen kops worden verhit, d.w.z. met vlammen die niet evenwijdig met de kopvlakken maar loodrecht hierop (evenwijdig met de lengteas van de ballon) zijn gericht; zie *fig. 2*. We zullen in het kort enkele bijzonderheden van deze methode bespreken.

Bij het aaneensmelten moeten de twee glazen delen roteren, zowel bij de conventionele verhitting met radiale vlammen als bij de kopse verhitting. Zonder rotatie zou men, ondanks de gebruikelijke onderverdeling van de warmtetoevoer in zeer vele kleine vlammetjes, onvermijdelijk een plaatselijke oververhitting van het glas tegenover elk afzonderlijk vlammetje krijgen, met als gevolg afdruipen

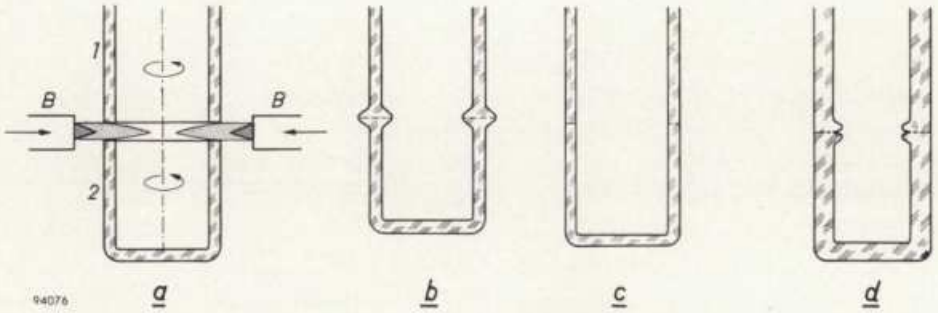


Fig. 1. *a*) Voor het aaneensmelten van twee dunwandige glazen delen *1* en *2* worden deze al draaiende verhit met een stel branders *B*, waarvan de vlammen ten naaste bij evenwijdig met de kopvlakken der te versmelten randen zijn gericht.
b) Gestuikte las, verkregen door de hete delen tegen elkaar te duwen.
c) Las na het strekken.
d) Bij het lassen van twee delen met grote wanddikte volgens dezelfde methode krijgt men geen goede las (kerf aan de binnenzijde).

[1]) F. G. Blackler, Katodestraalbuizen met langwerpig venster, Philips techn. T. **19**, 59-61, 1957 (no. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

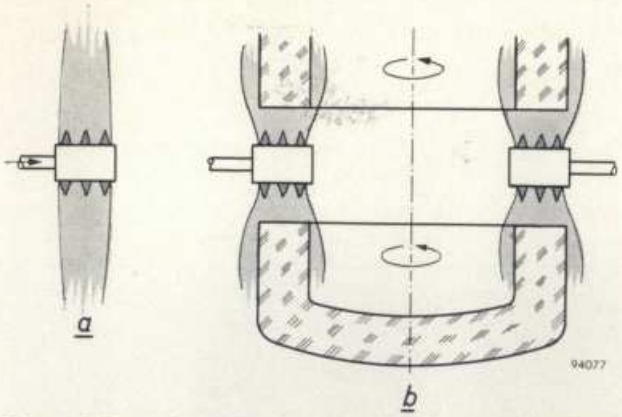


Fig. 2. Volgens de door Philips ontwikkelde aansmeltmethode voor dikwandig glas worden de te versmelten randen met behulp van doosvormige branders (*a*) kops verhit (*b*).

van het glas en mogelijke vorming van gasbelletjes. Bovendien is rotatie gewenst om kleine verschillen in de werking der gewoonlijk gebruikte gas-zuurstof-branders, ten gevolge van vervuiling of van afwijkende instelling, onschadelijk te maken: de warmtetoevoer van elke brander wordt over de hele omtrek uitgesmeerd.

Bij rotatiesymmetrische glazen delen brengt het roteren, dat naar gelang van de afmetingen plaatsvindt met 15 tot 30 omw/min, geen problemen mee: men kan de branders laten stilstaan tegenover de beide synchroon draaiende randen, en krijgt aldus een eenparige relatieve beweging van elk vlammetje over de gehele omtrek van de rand. Bij weergeefbuizen echter, waarbij venster en conus een afgerond rechthoekige vorm hebben, moeten speciale maatregelen worden getroffen opdat tijdens de rotatie van de glazen delen elk deel van de rand van een even grote warmtetoevoer wordt verzekerd.

In de eerste plaats moeten de branders radiaal heen en weer worden bewogen, ten einde ze voortdurend tegenover de te verhitten randen te houden. Deze eis geldt ook al bij de conventionele radiale verhitting, zie het in [1]) aangehaalde artikel. Bij de kopse verhitting komt er als tweede eis bij dat de doosvormige branderlichamen, die ieder aan boven- en onderkant enige rijen brandergaatjes voor de afzonderlijke vlammetjes bevatten, tijdens de radiale beweging ook moeten worden gezwenkt, zodanig dat de rijen gaatjes zich op elk ogenblik in de juiste stand tussen de randen van venster en conus bevinden. Aan deze eis wordt voldaan door de in *fig. 3* weergegeven constructie. Elke brander is bevestigd op een wagentje, dat met twee rollen rust tegen de omtrek van een profielschijf, die gelijkvormig is met de te versmelten randen. Het wagentje is draaibaar bevestigd aan een slede, die in een radiale rechtgeleiding door een persluchtcilinder in de richting van de profielschijf wordt gedrukt. Men ziet dat aldus automatisch het heen-en-weer gaan en het gelijktijdige zwenken van de branderlichamen worden bewerkstelligd. Toch is dit nog niet voldoende. Een globale beschouwing van fig. 3 doet reeds opmerken dat tijdens de beweging de vier hoeken van de aaneen te smelten delen zich langer tegenover elke brander bevinden dan de middens van de rechthoekszijden. Voor een gelijkmatige verhitting is derhalve nog een verdere maatregel nodig: men moet de brandstoftoevoer van de branders tijdens hun beweging op bepaalde wijze variëren.

Vóór we nader bespreken hoe dit wordt gedaan, completeren we de beschrijving van de algemene gang van zaken bij het aaneensmelten volgens deze methode. Rondom de ballon zijn twaalf branders geplaatst, gelijkmatig verdeeld over een boog van 247,5° (tussenruimten 22,5°), zie *fig. 4*. Op het ogenblik dat de beide randen een voldoend hoge temperatuur hebben verkregen, d.i. na een kopse verhitting van ongeveer 15 seconden, worden de branders van tussen de randen teruggetrokken en het venstergedeelte van de weergeefbuis wordt

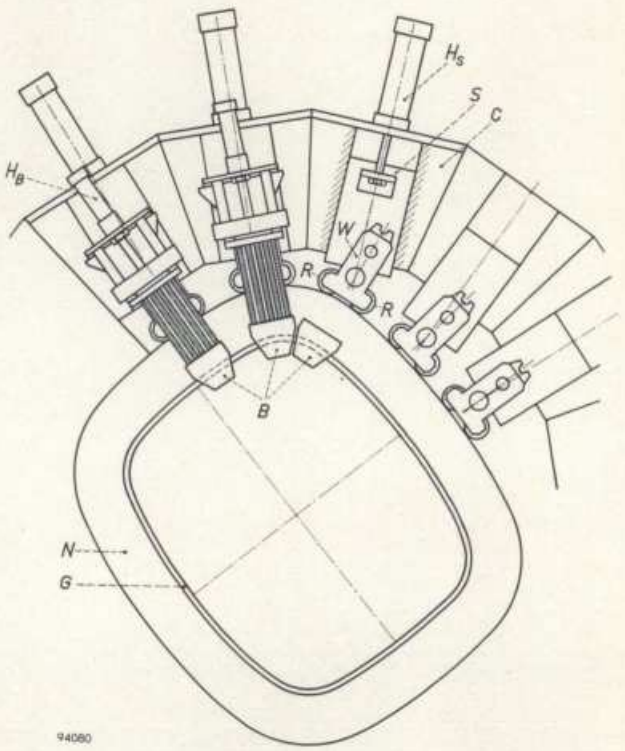


Fig. 3. Constructie voor het leiden van de branders, zodanig dat de brandergaatjes bij de kopse verhitting zich steeds tegenover de randen *G* van de, min of meer rechthoekige, glazen delen bevinden. Slechts twee van de twaalf brandersystemen zijn compleet getekend (links). Elke doosvormige brander *B* wordt gedragen door een wagentje *W*. Dit is draaibaar bevestigd op een slede *S* en wordt met twee rolletjes *R* tegen de profielschijf *N* gedrukt door de persluchtcilinder H_S (*C* is een rechtgeleiding voor de slede). Elke brander kan door een op het wagentje aangebrachte kleine persluchtcilinder H_B naar voren worden geschoven (voor de kopse verhitting) of worden teruggetrokken (voor de naverhitting).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

door omhoogbewegen van de opleginrichting tegen het conusgedeelte gedrukt. De zo verkregen gestuikte las volgens fig. 1*b* wordt gestrekt, door de opleginrichting weer enige mm omlaag te bewegen: aan de gestuikte las wordt dan getrokken door het eigen gewicht van het venster. Voor het strekproces („uitzakken" van het venster) is een zekere tijd nodig. Om te voorkomen dat de temperatuur van de laszone gedurende deze tijd te veel daalt, wordt een naverhitting van buitenaf toegepast. Door de naverhitting hoger of lager in de laszone te doen geschieden, hebben wij de manier van uitzakken in de hand. Men kan aldus lassen van behoorlijk gelijkmatige wanddikte verkrijgen.

De naverhitting, waarbij de ballon verder blijft roteren, bewerkstelligen wij met behulp van rijen brandergaatjes in het voorvlak van de reeds genoemde branderlichamen; zie *fig. 5a* en *b*. Deze gaatjes met hun brandstoftoevoerinrichting vormen een geheel gescheiden systeem. Bij het terugtrekken van de branders wordt automatisch de brandstoftoevoer overgeschakeld van het systeem voor de kopse verhitting naar het systeem voor de naverhitting. Het

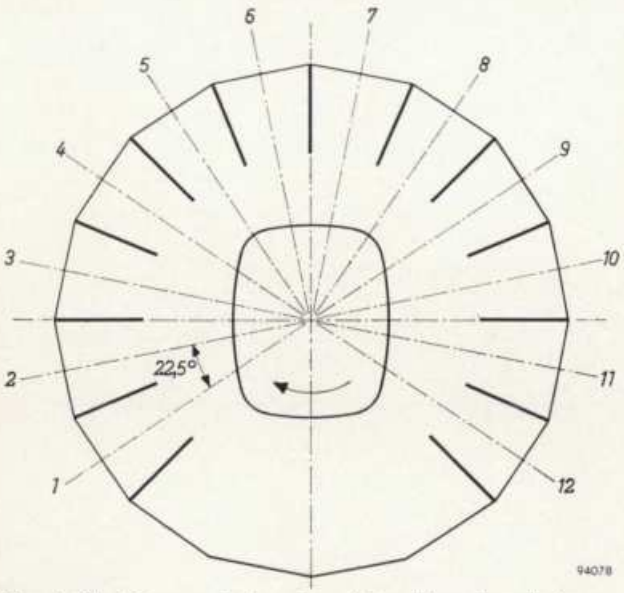


Fig. 4. Plaatsing van de branders *1* t/m *12* rondom de te versmelten glazen delen. Aan de voorzijde zijn de delen toegankelijk.

terugtrekken van elke brander geschiedt door een afzonderlijk persluchtcilindertje, dat de brander beweegt ten opzichte van het wagentje, waarvan de rolletjes dus tegen de profielschijf gedrukt blijven. De branders blijven derhalve tijdens het naverhitten van de roterende ballon hun heen-en-weer gaande en zwenkende beweging uitvoeren. Ook voor de naverhitting is een periodieke brandstofregeling nodig, op dezelfde wijze als voor de kopse verhitting.

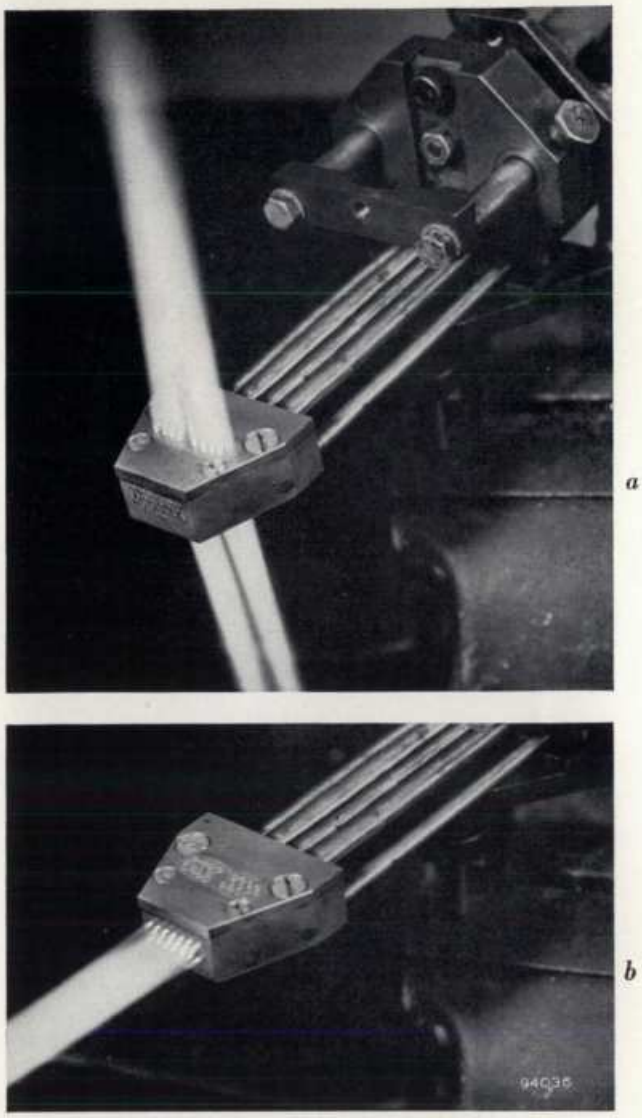
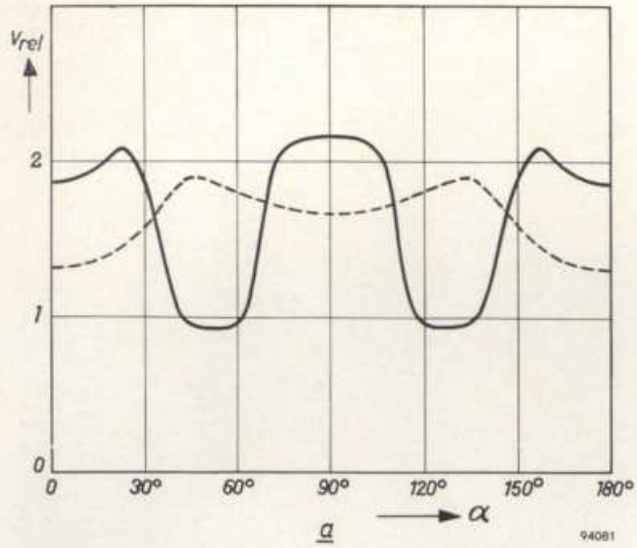


Fig. 5. Brandervlammen voor de kopse verhitting (*a*) en voor de naverhitting (*b*).

Welke periodieke variatie van de brandstoftoevoer vereist is, kan men nader bepalen aan de hand van *fig. 6a*. Hierin is, voor een 43 cm-weergeefbuis, de relatieve snelheid van een brander ten opzichte van het eronderdoor lopende glas uitgezet als functie van de tijd, of — wat op hetzelfde neerkomt — als functie van de relatieve rotatiehoek α van de voerstraal van de branderslede (fig. 6*b*). Zonder het zwenken van de brander zou men de betrekkelijk geringe variatie volgens de gestippeld getekende kromme krijgen; elk maximum hierin beantwoordt aan het passeren van een hoek van het venster, waar de lineaire snelheid van het glas natuurlijk het grootst is. Doordat echter in de hoek ook de zwenksnelheid van het branderwagentje, die op dat punt tegengesteld is aan de genoemde lineaire snelheid, het grootst wordt, ontstaat hier in werkelijkheid een diep minimum in de relatieve snelheid van het glas ten opzichte van de brander; zie de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



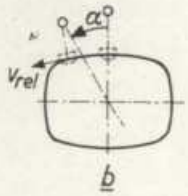


Fig. 6. *a*) Relatieve snelheid v_{rel} van een brander ten opzichte van het glas, als functie van de plaats (hoek α) van het branderwagentje ten opzichte van de wentelende glazen delen. De gestippelde kromme zou men krijgen als de brander niet zou zwenken doch steeds volgens de voerstraal zou blijven gericht. *b*) Ter toelichting van de definitie van α.

getrokken kromme. Uit de figuur blijkt dat de relatieve snelheid tijdens de rotatie van het glas varieert met ongeveer een factor 2.

Aangezien geringe temperatuurverschillen langs de te versmelten randen nog wel getolereerd kunnen worden, is het niet noodzakelijk de variatie van de brandstoftoevoer heel nauwkeurig bij het verloop van de kromme in fig. 6*a* aan te passen. Men blijkt in hoofdzaak te kunnen volstaan met een periodieke wisseling tussen twee niveaus (een kleine correctie hierop zullen we hieronder nog even aanstippen). Deze regeling wordt verwezenlijkt op de volgende wijze.

De twee in elke brander aanwezige systemen (voor kopse verhitting resp. naverhitting) worden ieder gevoed uit een afzonderlijke injecteur, waaraan zuurstof onder druk wordt toegevoerd en die gas aanzuigt. Dergelijke injecteurbranders met open vlam werken in het algemeen — en ook in ons geval — met een overmaat gas. Op het brandergaatje staat het primaire vlamfront, het bekende blauwe kegeltje, waar zoveel gas verbrandt als overeenkomt met de hoeveelheid zuurstof in het gas-zuurstofmengsel. De overmaat gas verbrandt aan de lucht uit de omgeving. Daar elk branderlichaam zich met zijn gaatjes op kleine afstand (ca. 7 mm) van de randen van venster en conus beweegt, wordt de hoeveelheid warmte, op elk ogenblik afgegeven aan het kopvlak van deze randen, in hoofdzaak bepaald door de momentele hoeveelheid zuurstof in het mengsel. De regeling van de brander vindt daarom plaats door variëren van de druk van de zuurstof die aan de injecteur wordt toegevoerd. De regelkamer is getekend in *fig.* 7. De zuurstof stroomt in deze kamer door twee openingen, een wijde, met een klep afsluitbare, en een veel nauwere (een „restrictie"). De klep wordt bestuurd door een nokschijf, die telkens wanneer een van de vier hoeken van de glazen delen onder de desbetreffende brander komt, de klepsteel vrijlaat, zodat de onder veerdruk staande klep dichtgaat. De zuurstof kan dan alleen via de restrictie stromen, waarover een aanzienlijk drukverval heerst; de open klep daarentegen veroorzaakt vrijwel geen drukverval. De zuurstofdruk aan de ingang van de injecteur wisselt dus periodiek tussen een lage waarde (bij de hoeken) en een hoge.

We vermelden nog enkele details van de praktische uitvoering. De in fig. 7 afgebeelde regelkamer bedient de injecteurs van twee branders, die diametraal tegenover elkaar staan, bij voorbeeld no. 1 en no. 9 in de situatieschets van fig. 4. Inderdaad moeten twee tegenover elkaar staande branders op elk ogenblik dezelfde zuurstoftoevoer krijgen. De vier branders no. 5 t/m 8, die geen overbuurman bezitten, hebben elk een regelkamer voor zich alleen. Er zijn dus voor de kopse verhitting acht regelkamers, die in één blok zijn opgenomen en waarvan de kleppen door acht, op één roterende as bevestigde, nokschijven met het juiste fazeverschil worden be-

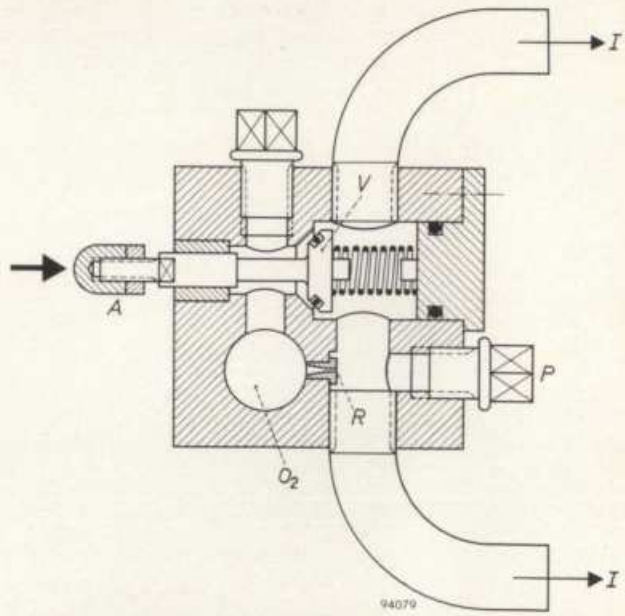


Fig. 7. Regelkamer voor het periodiek variëren van de druk waaronder zuurstof aan de injecteur *I* van een brander wordt geleverd. (Deze kamer bedient twee injecteurs.) O_2 zuurstoftoevoer aan regelkamer; *V* klep, die door indrukken van de klepsteel (met instelmoer *A*) tegen een veerdruk opengehouden wordt; *R* „restrictie", waardoor de zuurstof moet stromen als *V* gesloten is, met als gevolg een verminderde druk in de leiding naar de injecteur(s).

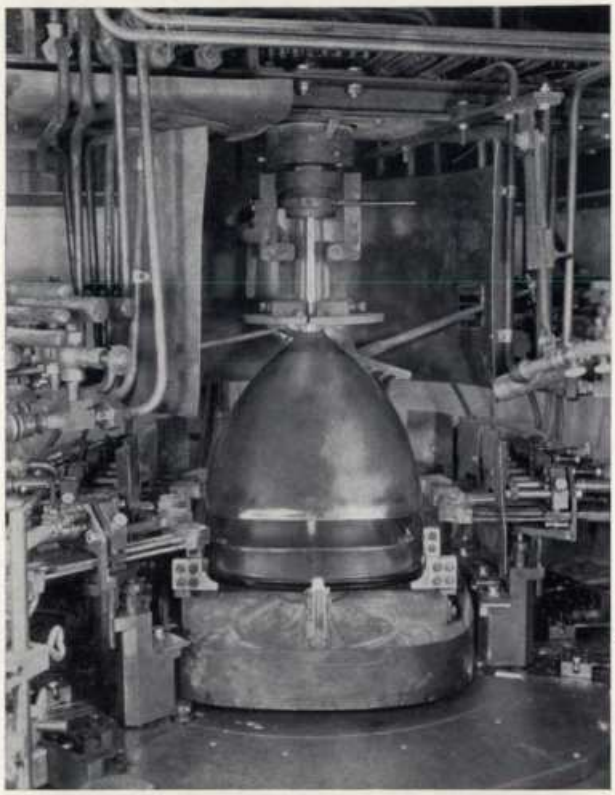
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stuurd. De as van de nokschijven moet natuurlijk een bepaalde, vaste hoekinstelling hebben ten opzichte van de profielschijf voor de beweging van de branders (en dus ten opzichte van het wentelende glas).

Bij de systemen voor de naverhitting is de regeling precies eender uitgevoerd; ook hier heeft men vier dubbele en vier enkele regelkamers. Deze zijn in een tweede blok opgenomen, in overeenkomstige volgorde als de regelkamers voor de kopse verhitting, zodat zij ook door dezelfde acht nokschijven kunnen worden bestuurd. De twee series regelkamers verschillen alleen in grootte van de restricties, omdat de brandergaatjes voor de kopse verhitting een grotere totale doorlaat hebben dan die voor de naverhitting. Ook zijn natuurlijk de restricties in de regelkamers met een dubbele injecteuraansluiting wijder dan in die met een enkele aansluiting. De restricties zijn aangepast bij de te vervaardigen ballon (d.w.z. bij de kromme van fig. 6*a*). Voor de produktie van andere ballons, b.v. van grotere weergeefbuizen, kan men in elke regelkamer de, in een schroefje aangebrachte, restrictie verwisselen na de plug P in fig. 7 te hebben verwijderd; tevens is het dan in het algemeen nodig andere nokschijven te monteren.

Elke nokschijf moet tijdens een volledige omwenteling van het glas twee identieke cyclussen doorlopen. Eenvoudigheidshalve zijn derhalve op elke schijf in plaats van vier nokken (voor de vier hoeken) slechts twee nokken aangebracht en laten we de schijven twee maal zo snel draaien als het glas. De „nokken" bestaan uit afplattingen aan de omtrek van de schijf. Met het oog op een overzichtelijke aanleg en goede toegankelijkheid van de toevoerleidingen hebben wij de beide blokken met de regelkamers voor de kopse verhitting (kamers K') resp. de naverhitting (kamers K'') recht tegenover elkaar geplaatst, aan weerszijden van de nokschijven; zie *fig. 8*. Dit brengt mee dat de kamers K' en K'' die door een zelfde nokschijf worden bediend, op branders moeten werken die in de machine op een hoekafstand van 90° van elkaar staan. Dus de nokschijf die de kamer $K'_{1,9}$ bedient, neemt tevens K''_5 voor zijn rekening, de schijf voor kamer $K'_{2,10}$ tevens de kamer K''_6, enz. Alle branders worden op deze wijze, bij de naverhitting zowel als bij de kopse verhitting, automatisch in de juiste faze ten opzichte van de wentelende glazen delen geregeld.



a

b

Fig. 9. *a*) Aanzicht van de aansmeltmachine, met hierin geplaatst venster- en conusgedeelte van een 43 cm-televisieweergeefbuis. De branders zijn nog teruggetrokken.
b) De branders zijn tussen de te versmelten randen van de beide glazen delen geschoven (in het werkelijke proces geschiedt dit pas nadat het glas gedurende een zekere tijd is voorverwarmd, wat hier ter wille van de duidelijkheid van de foto niet werd gedaan).

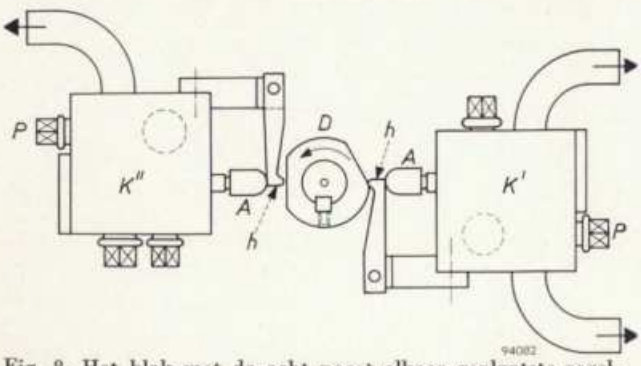


Fig. 8. Het blok met de acht naast elkaar geplaatste regelkamers K' voor de kopse verhitting, en het analoge blok met de regelkamers K'' voor de naverhitting, worden beide bestuurd door één nokkenas met acht nokschijven D. Het uiteinde A van elke klepsteel rust niet rechtstreeks tegen de bijbehorende nokschijf, doch er is een los draaiende en langs de kop van A glijdende hefboom h tussengeplaatst, om de klepsteel alleen axiaal te belasten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

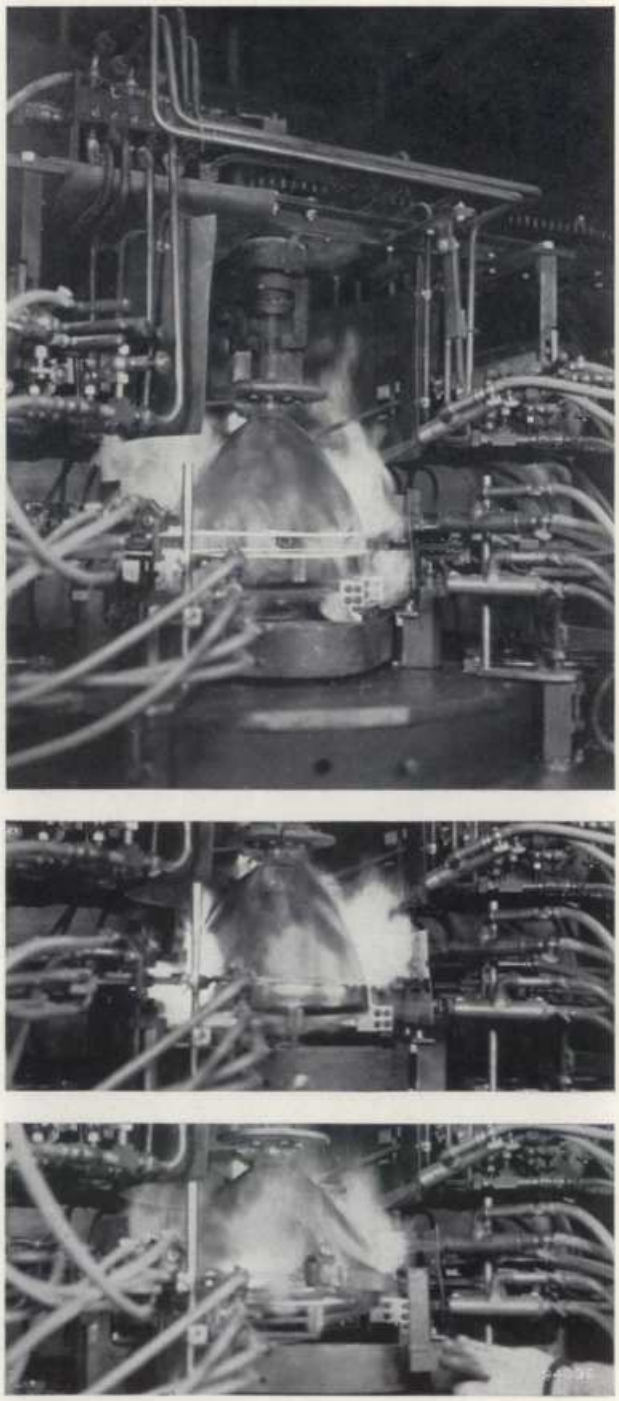


Fig. 10. Een soortgelijke buis als in fig. 9, tijdens het aaneensmelten.
a) De beide te versmelten randen zijn op de vereiste temperatuur gebracht.
b) De randen zijn tegen elkaar gedrukt, de naverhitting voor het strekken van de gestuikte las is aan de gang.
c) Het rollen van de laszone na het strekken.

Volgens de beschreven opzet krijgen alle twaalf branders dezelfde regelcyclus te doorlopen. In principe is dit niet noodzakelijk, daar het glas op elk punt van de rand het gemiddelde effect van alle branders zal vertonen. Inderdaad wordt bij één branderpaar voor de kopse verhitting van de beschreven cyclus afgeweken: hun nokschijf is voorzien van een extra-afplatting, zodanig aangebracht dat deze branders (en de met dezelfde schijf bediende brander voor de naverhitting) in het midden van de lange zijde van venster en conus minder brandstof krijgen toegevoerd. Zonder deze maatregel openbaarde zich het dal bij $\alpha = 0°$ in de kromme van fig. 6*a* als een te hete plek in het glas.

Tot slot geven we een aantal foto's van de aansmeltmachine, die het vervaardigen van een 43 cm-weergeefbuis illustreren. In verband met het gemakkelijker hanteren van de grote glazen onderdelen, voor en na het aaneensmelten, is de machine zo gebouwd dat de weergeefbuis er met zijn hartlijn verticaal in staat. In *fig. 9a* ziet men venster- en conusgedeelte in de juiste stand gebracht, met de branders nog in teruggetrokken positie; in fig. 9*b* zijn de branders naar binnen bewogen, zodat de branderlichamen zich tussen de randen van venster en conus bevinden.

Na het in draaiing brengen en voorverwarmen van het glas begint de kopse verhitting; deze duurt, zoals reeds eerder gezegd, ongeveer 15 seconden, het glas maakt in deze tijd ca. 4 omwentelingen. In *fig. 10a* is de kopse randverhitting juist voltooid en bevinden zich de branders reeds weer in de teruggetrokken positie. De randen van venster en conus worden tegen elkaar gedrukt, de naverhitting van de laszone begint (fig. 10*b*) en de venster-oplegінrichting zakt een weinig om de las te strekken. Als bijzonderheid kan nog vermeld worden dat direct bij het sluiten van de spleet tussen venster en conus een geringe, instelbare, overdruk in de ballon wordt teweeggebracht. Deze dient ter compensatie van de stuwdruk die de vlammen bij de naverhitting van de laszone uitoefenen en die anders een invallen van deze zone zou kunnen veroorzaken. Na het strekken van de las wordt de laszone aan de buitenzijde glad gerold met een rol van grafiet (fig. 10*c*).

De meeste van de beschreven handelingen zijn gemechaniseerd en worden bewerkstelligd door middel van een nokkenas, die achter de machine is gelegen.

Samenvatting. Voor het aaneensmelten van dikwandige glazen delen, zoals venster en conus van een weergeefbuis, wordt door Philips een methode toegepast waarbij deze delen al draaiende worden verhit met gas-zuurstofvlammen die loodrecht zijn gericht op de kopvlakken der te versmelten randen (kopse verhitting). Twaalf doosvormige branders worden tussen de randen van de, min of meer rechthoekige, roterende delen geplaatst en met behulp van een lei-mechaniek zodanig radiaal bewogen en gezwenkt dat de brandergaatjes zich steeds tegenover de te verhitten randen bevinden. Ter compensatie van de periodieke variaties in de relatieve snelheid van elke brander ten opzichte van het glas wordt periodiek en in de juiste faze de brandstoftoevoer (zuurstofdruk) van elke brander geregeld. Dit geldt ook voor de met dezelfde branders bewerkstelligde naverhitting van de verkregen las.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN EXPERIMENTELE GENERATOR MET WATERSTOFTHYRATRONS VOOR INDUCTIEVE VERHITTING

door H. L. van der HORST en P. H. G. van VLODROP. 621.385.38:621.365.5

Waterstofthyratrons zijn ontwikkeld voor het opwekken van impulsen waarmee magnetrons in radarzenders worden gemoduleerd. Blijkens het onderstaande artikel zijn ze ook met voordeel bruikbaar in een generator voor inductieve verhitting. De schakeling daarvan kan men beschouwen als een moderne versie van de aloude vonkoscillator uit de eerste jaren van de radiotelegrafie.

Verhitten van elektrisch geleidende materialen of voorwerpen door middel van erin geïnduceerde stromen is een in de techniek vaak toegepaste methode. Een algemeen voordeel ervan is de mogelijkheid, het verhitten zeer snel te doen geschieden. Voor gloeiprocessen, zoals voor oppervlakbehandeling nodig zijn, is het een bijzonder voordeel dat men de verhitting nauwkeurig kan doseren en localiseren, en voor smeltprocessen, zoals bereiden van legeringen en solderen van naden, is de grote zindelijkheid van belang. Het inductief te verhitten voorwerp wordt in een zg. werkspoel geplaatst, die via een transformator is aangesloten op een generator, zoals in *fig. 1* schematisch is voorgesteld.

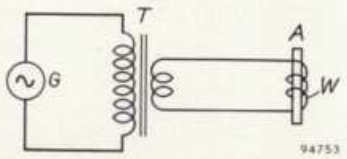


Fig. 1. Inductieve verhitting van een werkstuk *A*. *W* werkspoel. *T* transformator. *G* generator.

Met het oog op het rendement is de juiste keuze van de frequentie van belang. Zoals vroeger in dit tijdschrift is aangetoond [1]), bestaat er een zekere minimumfrequentie f_{min} die nodig is om te maken dat van het vermogen dat aan de werkspoel wordt toegevoerd, een groot deel in het werkstuk terechtkomt. De minimumfrequentie is hoger naarmate het werkstuk kleiner van afmetingen, kleiner van geleidingsvermogen en kleiner van permeabiliteit is. Vooral de afmetingen lopen sterk uiteen. Slechts bij afmetingen die corresponderen met hoeveelheden in de orde van 1000 ton, ligt f_{min} in de buurt van de netfrequentie. Bij kleinere hoeveelheden (de meerderheid der gevallen) is men, met het oog op het rendement, dus aangewezen op een generator van hogere frequentie.

Voor hoeveelheden materiaal in de orde van honderden tot enkele kg komen als generator roterende omzetters in aanmerking. Deze worden geconstrueerd voor een vaste frequentie, van maximaal ca. 10^4 Hz, en voor vermogens tot ca. 1000 kW. Het verhitten van nog kleinere hoeveelheden geschiedt bij voorkeur bij hogere frequenties (10^4 tot 10^7 Hz), die met vacuümbuizen (zendbuizen) worden opgewekt. Dank zij de tegenwoordige stand van de zendbuizentechniek zijn generators van 500 kW goed realiseerbaar. Zij vinden toepassing o.a. voor het bereiden van legeringen.

Volledigheidshalve, maar vooral ook in verband met hetgeen volgt, noemen wij nog een oudere opwekker van hoogfrequente trillingen: de vonkoscillator, enige tientallen jaren geleden nog algemeen gebruikt in de radiotelegrafie. De lading die in een condensator is opgehoopt, krijgt hierbij periodiek gelegenheid om via een vonkbrug af te vloeien over een trillingskring, waarin dan een gedempte trilling wordt opgewekt.

Van 1947 dateren proeven in het Philipslaboratorium te Eindhoven om de vonkoscillator in moderne vorm te doen herleven, door de vonkbrug te vervangen door één of meer senditrons (gelijkrichtbuizen met kwikkatode en capacitieve ontsteekelektrode) [2]). Zulk een oscillator zou het voordeel hebben van een hoger rendement dan een oscillator met een zendbuis. Gebleken is echter dat met een bepaald soort thyratrons (gelijkrichtbuizen met gloeikatode, stuurrooster en gasvulling) hogere frequenties te verkrijgen zijn dan met senditrons. Bedoeld zijn de waterstofthyratrons, ontwikkeld voor het moduleren van magnetrons in radarzenders. *Fig. 2* toont een waterstofthyratron type 5949. Als vulgas is waterstof gekozen omdat dit de kortste ontioniseringstijd heeft. Daaraan is het te danken dat met deze thyratrons in de hieronder beschreven schakeling vrij

[1]) E. C. Witsenburg, Verhitting door hoogfrequente velden, I. Inductieve verhitting, Philips techn. T. **11**, 165-175, 1949.

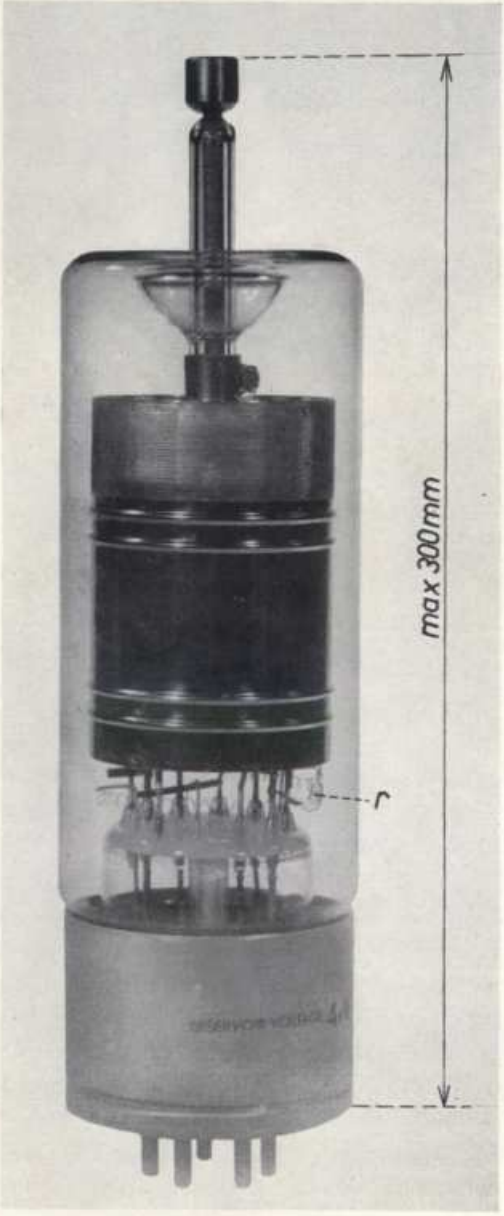
[2]) Tj. Douma, A new method for converting D.C. energy into high-frequency A.C. energy with a high efficiency, especially intended for high-frequency induction heating, Communic. News **10**, 52-68 en 69-82, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hoge frequenties kunnen worden opgewekt, namelijk tot 10 kHz. Door de hogere boogspanning en de aanwezigheid van een gloeidraad is het rendement iets lager dan van senditrons, maar nog altijd zoveel hoger dan van zendbuizen dat geforceerde koeling met water of lucht achterwege kan blijven. Dit is in de praktijk een belangrijk voordeel.

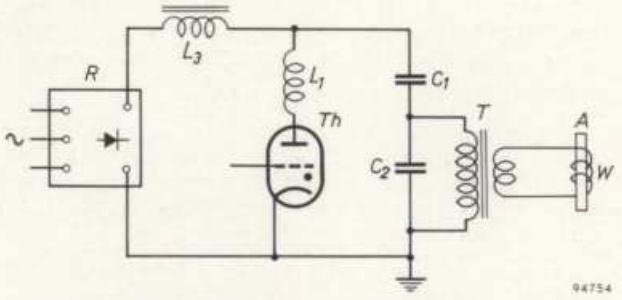
Bij een generator met zelfoscillerende vacuümbuis en met variabele belasting — zoals men bij inductieve verhitting heeft — kunnen belastingstoestanden optreden waarin de buis overbelast wordt. Dit maakt dus beveiligingsmaatregelen nodig, of althans een zekere deskundigheid bij de bediening. De hieronder beschreven generator wekt gedempte trillingen op, waarvan de demping varieert met de belasting. Van deze veranderingen in demping wordt partij getrokken om de waterstofthyratrons zodanig te besturen dat men generlei voorzorgen meer behoeft te nemen. De bediening wordt dus zeer eenvoudig.



94751

Fig. 2. Philips waterstofthyratron 5949. Anodespanning: top maximaal 25 kV in beide richtingen. Anodestroom: top maximaal 500 A, gemiddelde waarde maximaal 0,5 A. De buis bevat een waterstofreservoir *r*, in de vorm van een afzonderlijke gloeidraad. Zolang deze koud is, is vrijwel al de waterstof eraan geadsorbeerd. Wordt hij aangesloten op de voorgeschreven spanning, dan stelt zich de juiste waterstofdruk in.

Het schakelschema in zijn eenvoudigste vorm is weergegeven in *fig. 3*. De werking is als volgt. Terwijl het thyratron *Th* nog niet geleidt, laadt de meerfazige gelijkrichter *R* (spanning V_0) de condensator C_1 over de smoorspoel L_3 tot een spanning die hoger dan V_0 kan zijn (maximaal $2V_0$); de ventielen in de gelijkrichter beletten dat C_1 zich langs deze weg weer zou ontladen. Vervolgens wordt *Th* door een impuls op het stuurrooster ontstoken. C_1 kan zich nu over de stroombegrenzende smoorspoel L_1 en het thyratron ontladen in de condensator C_2. De transformator *T* is belast met de werkspoel *W*, waarin het werkstuk *A* is geplaatst. Men kan *T* vervangen denken door een bepaalde zelfinductie L_2



94754

Fig. 3. Schema van een generator met waterstofthyratron, voor inductieve verhitting. Condensator C_1 wordt over smoorspoel L_3 geladen door gelijkrichter *R* (thyratron *Th* nog niet geleidend). Bij het ontsteken van *Th* ontlaadt C_1 zich over de stroombegrenzende smoorspoel L_1 en *Th* in de condensator C_2, die met de zelfinductie waardoor men de belaste transformator *T* vervangen kan denken, een trillingskring vormt. Deze kring voert dan een gedempte trilling uit. *W* werkspoel. *A* werkstuk.

en een weerstand, en deze vormen met de capaciteit C_2 een trillingskring. Daar de zelfinductie L_1 slechts een fractie van L_2 is, gebeurt het ontladen van C_1 in C_2 zeer snel. De kring L_2-C_2 wordt daarbij aangestoten en gaat een gedempte trilling uitvoeren. Het thyratron is inmiddels gedoofd. De spanning over C_1 gaat geleidelijk weer oplopen, en zodra C_1 opnieuw voldoende geladen is, kan men de cyclus door een volgende ontsteekimpuls op het rooster van *Th* herhalen. Er zijn talrijke varianten op deze schakeling mogelijk. De hier beschrevene heeft het voordeel dat de katode van het thyratron en één zijde van de gelijkrichter en van de transformator aan aarde gelegd kunnen worden, wat bij de gebruikte hoge spanning ($V_0 = 10$ kV) van belang is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om de schakeling te doen werken zoals zojuist beschreven is, moet aan verschillende voorwaarden zijn voldaan. Wij willen deze hier zeer globaal afleiden.

Nadere analyse van de schakeling [3]) leert dat het in hoofdzaak aankomt op twee parameters: de capaciteitsverhouding C_1/C_2 en de zelfinductieverhouding L_1/L_2. De capaciteitsverhouding heeft invloed op het verloop van de spanning v_{th} over het thyratron. Voor het geval $L_2 \gg L_1$ geven *fig. 4a, b* en *c* het verloop van v_{th}/V_0 bij $C_1/C_2 =$ resp. $\frac{1}{2}$, 1 en 2. Slechts bij $C_1/C_2 = 1$ wordt v_{th} noch in positieve noch in negatieve zin groter dan $2V_0$, zodat in dat geval het thyratron het gunstigst wordt gebruikt wat de spanning betreft. In de praktijk echter treedt de gunstigste toestand op bij een wat kleinere waarde van C_1/C_2, b.v. bij $C_1/C_2 \approx 0{,}75$. Dit komt doordat L_2, hoewel groter dan L_1, niet vele malen groter dan L_1 is (fig. 4 geldt slechts voor $L_2 \gg L_1$).

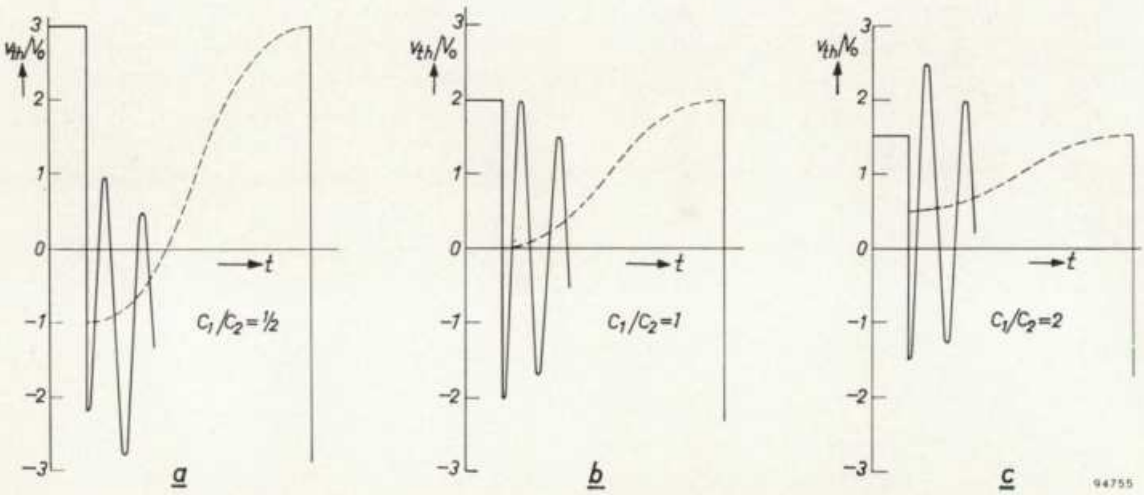


Fig. 4. v_{th}/V_0 als functie van de tijd t en met C_1/C_2 als parameter, voor het geval $L_2 \gg L_1$. Alleen indien $C_1/C_2 = 1$, wordt v_{th} noch in positieve noch in negatieve zin groter dan $2V_0$.

Essentieel voor de goede werking is dat het thyratron telkens automatisch dooft. De ontlaadstroom van C_1 doorloopt de serieschakeling van L_1, het thyratron en de parallelkring L_2-C_2. Om het thyratron vanzelf te doen doven, moet men de elementen van deze kring zodanige waarden geven dat de stroom de waarde nul bereikt. Of dit al dan niet het geval zal zijn, hangt voornamelijk af van de zelfinductieverhouding L_1/L_2. In het artikel [2]) is voor het geval $C_1 \gg C_2$ (en met verwaarlozing van weerstand) afgeleid dat de voorwaarde voor het nul worden van de stroom luidt: $L_1/L_2 \leqq 0{,}217$. Is echter $C_1 \approx C_2$ (zie boven), dan geldt eveneens dat L_1/L_2 beneden een zekere maximumwaarde moet blijven, maar dit maximum is dan hoger, b.v. 0,35.

De zelfinductie L_1 bepaalt mede de tijd die nodig is voor het ontladen van C_1 in C_2. Om deze tijd zo kort mogelijk te houden, zou men L_1 zo klein mogelijk willen kiezen. Beneden een zekere waarde mag men echter niet gaan, omdat anders de stroom door het thyratron de maximaal toelaatbare topwaarde zou overschrijden. Om een ruwe schatting van de minimumwaarde van L_1 te kunnen maken, mag men in eerste benadering de tak L_2 wegdenken en het spanningsverlies in het thyratron (ca. 150 V) verwaarlozen ten opzichte van de spanning V_{C1} (b.v. 15 kV) tot welke de condensator C_1 geladen was. In deze benadering bestaat de keten slechts uit de serieschakeling van de capaciteiten C_1 en C_2 (te vervangen door één capaciteit $C' = C_1C_2/(C_1 + C_2)$) en de zelfinductie L_1. De stroom die hierin loopt, bereikt een topwaarde

$$\hat{I}_a = \frac{V_{C1}}{\sqrt{\frac{L_1}{C'}}},$$

dus

$$L_1 = \left(\frac{V_{C1}}{\hat{I}_a}\right)^2 \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Bij het thyratron 5949 mag $\hat{I}_a$ maximaal 500 A bedragen. In de praktijk echter blijkt dat men L_1 enige malen zo groot moet kiezen als uit de laatste vergelijking volgt; anders zouden namelijk onmiddellijk na het doven van het thyratron de restionisatie nog zo sterk zijn en de negatieve anodespanning zo snel toenemen dat er terugslag zou kunnen optreden.

[3]) Zie een artikel dat binnenkort in Electronic Applications zal verschijnen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

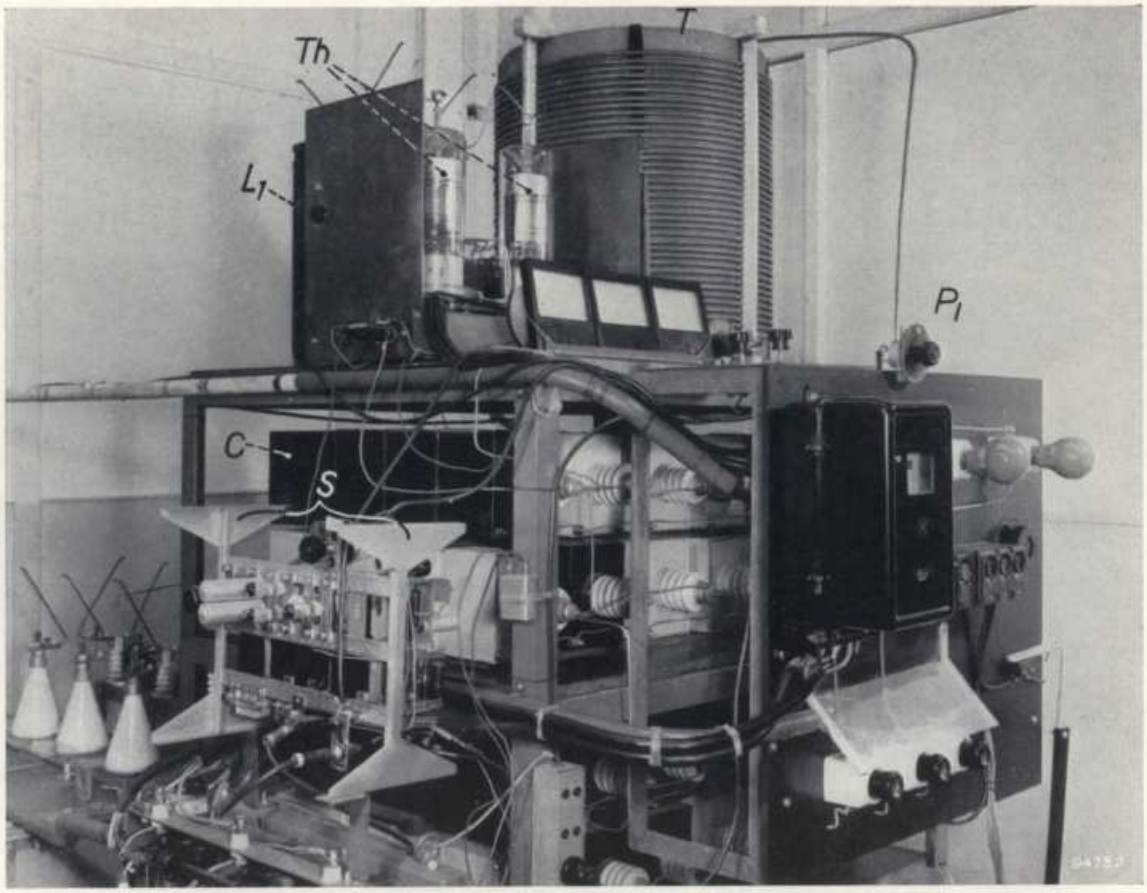


Fig. 5. Experimentele opstelling van een generator met twee parallelgeschakelde waterstofthyratrons 5949 (*Th*) voor inductieve verhitting. L_1 één van de smoorspoelen in serie met de thyratrons. *C* condensatoren waaruit C_1 en C_2 (fig. 3) zijn samengesteld. *T* transformator (vgl. fig. 6). *S* stuurinrichting (vgl. fig. 7). P_1 potentiometer waarmee het vermogen wordt geregeld.

De frequentie f_0 waarmee de kring L_2-C_2 oscilleert, is

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}.$$

Dank zij het gebruik van waterstof als vulgas in het thyratron, kan men met f_0 tot 10 000 Hz gaan. Dit geeft de volgende betrekking tussen L_2 en C_2:

$$L_2 C_2 = \frac{1}{4\pi^2 \times 10^8} \text{ henry} \times \text{farad}.$$

In het bovenstaande heeft men richtlijnen bij het kiezen van C_1, C_2, L_1 en L_2.

Rest nog de zelfinductie L_3 van de smoorspoel waarover C_1 wordt geladen (fig. 3). Een te kleine waarde van L_3 maakt dat het thyratron, wanneer het eenmaal ontstoken is, niet meer dooft en een kortsluiting over de gelijkrichter vormt. Een te grote waarde van L_3 heeft onder bepaalde omstandigheden tot gevolg dat C_1 geladen wordt tot een te hoge spanning, zo hoog dat het thyratron niet meer stroomloos gehouden kan worden. Experimenteel is ons gebleken dat deze twee uiterste waarden van L_3 niet zeer ver uit elkaar liggen.

In onze proefopstelling (*fig. 5*) zijn twee thyratrons 5949 parallelgeschakeld. Om de stroom gelijkmatig over de twee buizen te verdelen, is in serie met elke buis een smoorspoel met zelfinductie $2L_1$ geschakeld; deze twee smoorspoelen komen in de plaats van de ene smoorspoel L_1. De verschillende grootheden hebben de volgende waarden: $C_1 =$ 0,35 μF, $C_2 =$ 0,48 μF, $L_1 =$ 175 μH (dus 350 μH in serie met elke buis), $L_2 =$ 525 μH, $L_3 =$ 0,29 H, $f_0 =$ 10 kHz, $V_0 =$ 10 kV.

Een zendbuisoscillator moet bij veranderingen in de belasting aangepast worden, door bijregelen van een capaciteit en van de koppeling tussen de spoelen van de hoogfrequentietransformator. Bij de generator met waterstofthyratrons is dit niet nodig, zodat de bediening eenvoudiger is. Bovendien kon daardoor een transformator met onveranderlijke en zeer vaste koppeling worden gebruikt, die weinig verliezen heeft. De constructie is toegelicht in *fig. 6*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Aan deze experimentele installatie is het totale rendement bepaald, d.i. de verhouding van het vermogen P_2 dat in een bepaald werkstuk wordt ontwikkeld, tot het vermogen P_1 dat de gelijkrichter uit het net opneemt (dus inclusief de verliezen in de gelijkrichter, in de transformator en in de werkspoel). P_2 werd gemeten door als werkstuk een dubbelwandige stalen cilinder te gebruiken, waarbij water tussen de wanden door stroomde; uit de hoeveelheid water die per seconde doorstroomt, en de temperatuurverhoging die daarbij optreedt, volgt P_2. Gevonden werd: $P_2/P_1 = 5400$ W/8490 W = 63,4%. Door een doelmatiger dimensionering van de apparatuur zal het totale rendement wellicht nog opgevoerd kunnen worden tot ca. 70%.

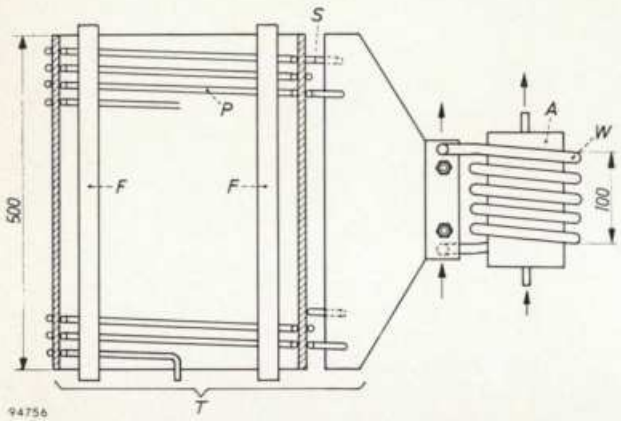


Fig. 6. Doorsnede van de transformator T. De primaire spoel P en de secundaire spoel S hebben evenveel en even dikke windingen; die van P staan in serie, die van S zijn twee aan twee parallelgeschakeld. Doordat tegenover iedere primaire winding een secundaire winding ligt, en door het gebruik van 36 staven ferroxcube F is een zeer vaste koppeling verkregen. De werkspoel W wordt, zo nodig, met water gekoeld; het werkstuk A, ter bepaling van het erin ontwikkelde vermogen, eveneens. Maten in mm.

Een belangrijke grootheid is het aantal ontladingen van C_1 in C_2 per seconde, dus de herhalingsfrequentie f_r van de impulsen die de thyratrons ontsteken. Door regeling van f_r kan men op eenvoudige wijze het vermogen tussen wijde grenzen variëren. De schakeling voor het opwekken van deze impulsen is weergegeven in *fig.* 7. In het gedeelte A bevindt zich een condensator C_3, die uit een gelijkspanningsbron over een weerstand R_1 wordt geladen. Parallel met C_3 is een (klein) thyratron Th_1 geschakeld, dat aanvankelijk stroomloos wordt gehouden door een negatieve roosterspanning, ontleend aan een potentiometer P_1. Naarmate tijdens het laden van C_3 de potentiaal van het punt Q stijgt, wordt de roosterspanning minder negatief, en bij een bepaalde waarde zal Th_1 doorslaan. C_3 ontlaadt zich dan door Th_1. De katode van Th_1 neemt daarbij voorbijgaand een hoge potentiaal aan, en deze impuls ontsteekt het thyratron Th_2 in het gedeelte B van de schakeling. De in een vertragingslijn (kunstkabel) L_5-C_5-L_6-C_6 opgehoopte energie ontlaadt zich nu via Th_2, zodat aan de katodeweerstand R_5 een rechthoekige impuls van constante duur (2 µsec) ontstaat (de duur is twee maal de looptijd langs de vertragingslijn). Deze impulsen zijn geschikt om er de waterstofthyratrons mee te

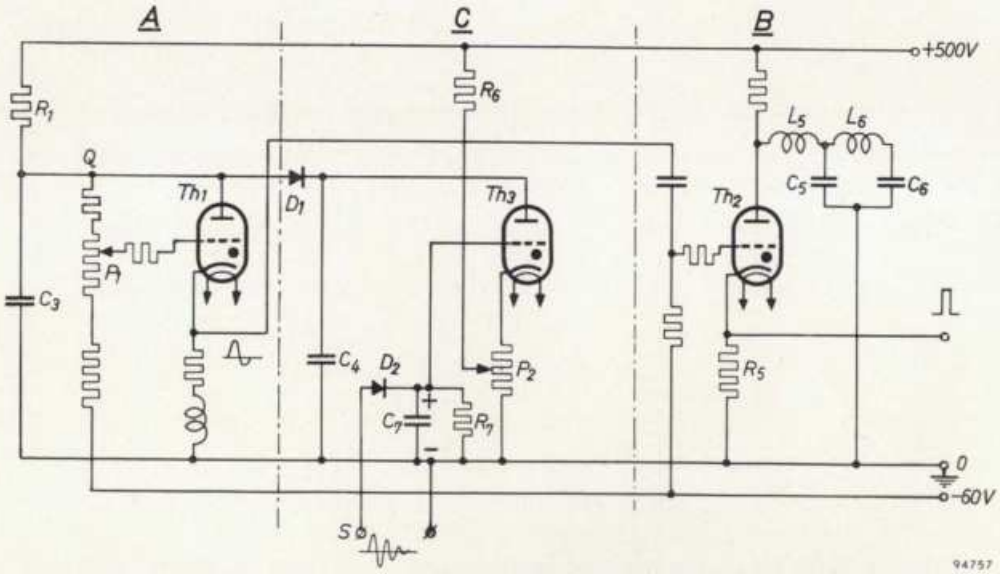


Fig. 7. Stuurschakeling. In A worden hulpimpulsen opgewekt, die in B de impulsen produceren die de waterstofthyratrons ontsteken. C dient voor automatische verlaging van de herhalingsfrequentie wanneer de demping klein wordt (verwijdering van het werkstuk uit de werkspoel). Th_1, Th_2 en Th_3 zijn thyratrons van gering vermogen met edelgasvulling (type PL 5727, „Special Quality"). Met de potentiometer P_1 wordt de herhalingsfrequentie geregeld. L_5-C_5-L_6-C_6 is een vertragingslijn. Voor verdere verklaring, zie tekst.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ontsteken. De steile achterflank van de impuls bevordert een snelle ontionisering. De herhalingsfrequentie f_r is regelbaar met de negatieve roosterspanning van Th_1, dus met de potentiometer P_1 (fig. 5). Naarmate f_r hoger is, is de gemiddelde waarde van de anodestroom der waterstofthyratrons groter. Deze mag per buis 5949 maximaal 0,5 A bedragen. Dit stelt aan f_r een bovenste grens, die in onze installatie ca. 250 Hz bedraagt.

Niet alleen kan men aldus met behulp van een kleine potentiometer het vermogen regelen, maar ook kan gezorgd worden voor een automatische vermindering van het vermogen wanneer het werkstuk uit de werkspoel wordt verwijderd. Daarvoor dient het gedeelte C in fig. 7. Hierin zijn een condensator C_4 en een thyratron Th_3 over een ventiel D_1 parallelgeschakeld met de condensator C_3. De stroom die door de weerstand R_6 en het onderste gedeelte van de potentiometer P_2 vloeit, wekt aan P_2 een spanning op die als negatieve roosterspanning het thyratron Th_3 normaal stroomloos houdt. C_4 laadt zich over D_1 tot de hoogste spanning die C_3 ooit bereikt, en behoudt deze spanning, daar D_1 belet dat lading van C_4 naar C_3 terugvloeit. De condensator C_4 is, na geladen te zijn, dus werkeloos, tenzij hij zich over Th_3 ontladen heeft: dan staat hij parallel met C_3, de tijdconstante in deel A neemt toe van R_1C_3 tot $R_1(C_3 + C_4)$, de herhalingsfrequentie f_r neemt dienovereenkomstig af — b.v. tot 1 imp/sec — en het vermogen eveneens. Het ontsteken van Th_3, dat deze gang van zaken inleidt, kan men doen geschieden in afhankelijkheid van de demping van de trillingskring (T-C_2, fig. 3). Daartoe is op de transformator T een hulpspoel aangebracht, die is aangesloten tussen het punt S en aarde (fig. 7). De gedempte wisselspanning die in deze spoel wordt geïnduceerd, levert via het ventiel D_2 over de kring R_7-C_7 een gelijkspanning, die voor de buis Th_3 een positieve roosterspanningscomponent betekent. De spanningen en de tijdconstante R_7C_7 zijn zo gekozen dat bij normale (sterke) demping deze gelijkspanning niet voldoende is om Th_3 te ontsteken, maar bij zwakke demping (b.v. onbelaste werkspoel) wèl. De herhalingsfrequentie daalt dus discontinu tot een lage waarde zodra de demping beneden een bepaalde waarde komt. Bij welke waarde dit gebeurt, is in te stellen met de potentiometer P_2.

Behalve zulk een discontinue verandering van f_r zijn ook automatische continue veranderingen mogelijk. De behoefte hieraan doet zich voor wanneer f_r zo hoog is, of de demping zo klein, dat de trilling bij het opnieuw ontsteken van het waterstofthyratron nog een aanmerkelijke amplitude heeft. Het vermogen varieert dan merkbaar met de faze van de ontsteking ten opzichte van de trilling. Ongewenst opslingeren van de spanning over de trillingskring wordt voorkomen door het ontsteken te doen geschieden bij een top (*fig. 8*) die overeenkomt met een negatieve amplitude van de spanning over het waterstofthyratron. Zulk een synchronisatie

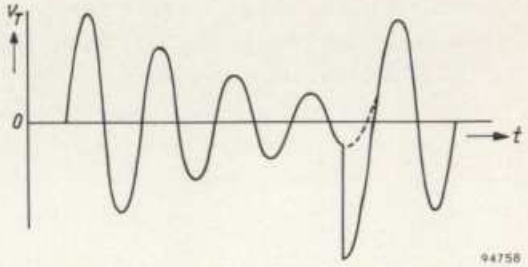


Fig. 8. Spanning v_T over de trillingskring. Herontsteking van het thyratron bij een negatieve top van v_T (negatief betekent hier: negatief ten opzichte van aarde) voorkomt ongewenst opslingeren van de spanning over de trillingskring.

bereikt men met een kleine uitbreiding van het gedeelte A in fig. 7, namelijk door aan de exponentieel oplopende roosterspanning van Th_1 een kleine wisselspanning toe te voegen, die weer betrokken wordt van een hulpspoel op de transformator. De totale roosterspanning krijgt dan een verloop zoals in *fig. 9* is getekend. Hieruit blijkt dat de ontsteking in de buurt van een top van de rimpelspanning zal geschieden. Maar ook zal duidelijk zijn dat het ontstekingsmoment enigszins zal afhangen van de demping: wordt de demping b.v. zwakker, dan zal de rimpelspanning aan het eind van iedere periode $1/f_r$ een grotere amplitude hebben overgehouden, de ontsteking zal daardoor iets vroeger komen, f_r wordt hoger en het vermogen groter. Er zijn zowel gevallen denkbaar waarin dit effect gunstig is (b.v. wanneer een ijzeren voorwerp het Curie-punt bereikt, waarbij de sterk afnemende permeabiliteit vergroting van het toegevoerde vermogen wenselijk maakt) als

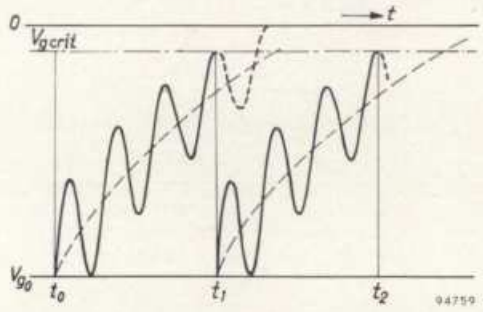


Fig. 9. Streepjeslijn: de exponentieel oplopende roosterspanning van Th_1 in fig. 7. V_{g0} negatieve voorspanning. Ter synchronisatie van de ontsteking wordt op de exponentieel oplopende spanning een gedempte wisselspanning gesuperponeerd. Dit maakt dat de ontsteking — bij overschrijden van de kritische roosterspanning $V_{g\,cr}$ — geschiedt in de buurt van de top der wissel-spanning, bij $t = t_1, t_2$, enz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gevallen waarin het ongunstig is. In de eerstgenoemde gevallen bestaat er behoefte om het genoemde effect te versterken, in de andere gevallen om het te compenseren of zelfs over te compenseren. Zowel het een als het ander is gemakkelijk te doen, namelijk door in de roosterketen van Th_1 (fig. 7) ook nog een gelijkspanning op te nemen die afhangt van de gedempte wisselspanning, en die verkregen wordt door gelijkrichting van deze wisselspanning, juist zoals dit is beschreven voor thyratron Th_3. Met de ene polariteit van deze gelijkspanning wordt het effect versterkt, met de andere wordt het verzwakt of zelfs omgekeerd. Op deze wijze kan men f_r continu — en op de wijze die men wenst — van de demping doen afhangen.

Met deze (onvolledige) opsomming van mogelijkheden die de besturing biedt, hebben wij willen aantonen dat de nieuwe generator zo kan worden gemaakt dat geen ingewikkelde beveiligingsmaatregelen nodig zijn en dat bijzonder weinig deskundigheid bij de bediening is vereist. Tegenover de beperking van de frequentie tot 10 kHz staan verder nog de genoemde voordelen dat de buizen geen geforceerde koeling behoeven en dat het rendement hoger is.

Samenvatting. Met een schakeling die overeenkomst vertoont met de vonkoscillator uit de beginperiode van de radiotelegrafie, maar waarin de vonkbrug is vervangen door een waterstofthyratron, kunnen gedempte trillingen worden opgewekt met een frequentie van maximaal 10 kHz. Deze zijn bruikbaar voor inductieve verhitting. Het vermogen is regelbaar met de herhalingsfrequentie van de impulsen die het thyratron ontsteken. Beschreven wordt een stuurschakeling voor het opwekken van deze impulsen, die van automatische regelingen is voorzien. Doordat bij veranderingen in het werkstuk geen wijziging van capaciteit of koppeling nodig is, is de bediening eenvoudiger dan die van een generator met zendbuis. Andere voordelen boven een generator van dit laatste type zijn dat de buis geen geforceerde koeling nodig heeft en dat het rendement hoger is.

DE LEVENSDUUR VAN VOORSCHAKELAPPARATEN VOOR GASONTLADINGSLAMPEN

I. TRANSFORMATOREN EN SMOORSPOELEN

door Th. HEHENKAMP. 621.327.032.43:621.314.2:621.318.42

Voorschakelapparaten voor gasontladingslampen behoren tot de artikelen die lange tijd moeten meegaan — b.v. 20 jaar — en laag in prijs moeten zijn. Voor de ontwerper van deze apparaten betekent dit dat hij de isolatiematerialen waarmee hij werkt, goed moet weten te kiezen en ze de hoogste temperatuur moet laten bereiken waarbij de levensduur nog bevredigend is. Daartoe zijn levensduurproeven nodig. Deze moeten, gezien de lange tijden waarom het hier gaat, op een geschikte wijze versneld worden. Van groot belang is ook dat de officiële voorschriften waaraan voorschakelapparaten moeten voldoen, de ontwikkeling van goedkopere apparaten van goede kwaliteit niet nodeloos belemmeren door het vaststellen van onnodig lage maximumtemperaturen.

Een voorschakelapparaat bestaat in het algemeen uit een smoorspoel of een transformator, veelal gecombineerd met een condensator. Het onderstaande deel I gaat over transformatoren en smoorspoelen. Condensatoren zullen worden behandeld in deel II, dat later zal verschijnen.

Factoren die de levensduur van een transformator bepalen

Onder de levensduur van transformatoren (waartoe wij in dit artikel ook smoorspoelen zullen rekenen) verstaat men de tijd die de transformator in werking kan zijn voordat de isolatie van de wikkelingen bezwijkt onder de elektrische veldsterkte waaraan ze is blootgesteld. Deze tijd is bepaald door twee grootheden: de reserve aan isolerend vermogen die in nieuwe toestand aanwezig is, en de snelheid waarmee deze reserve afneemt tot nul, bij welke waarde de isolatie het begeeft.

De reserve aan isolerend vermogen hangt af van de kwaliteit van de gebruikte isolatiematerialen, van de hoeveelheden dezer materialen, en van de wijze waarop ze zijn verwerkt. De reserve in nieuwe toestand is gemakkelijk te controleren, door een beproeving met spanningen die een veelvoud

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn van de spanningen die in de praktijk optreden. Daarentegen is de snelheid waarmee de isolatie tijdens het werken in kwaliteit achteruitgaat — de snelheid van veroudering — veel moeilijker vast te stellen. De volgende factoren kunnen daarbij van invloed zijn:

1) de elektrische veldsterkte in de isolatie,
2) de mechanische belasting die op het isolatiemateriaal wordt uitgeoefend,
3) klimatologische omstandigheden, en
4) de temperatuur van het isolatiemateriaal.

Bij transformatoren voor gasontladingslampen zijn de eerste twee factoren van ondergeschikt belang. In het algemeen namelijk zijn deze transformatoren bestemd voor matige spanningen (uitgezonderd bij neoninstallaties; deze blijven hier buiten beschouwing) en kleine vermogens. Ionisatie in het isolatiemateriaal komt daarbij niet voor, zodat de invloed van de veldsterkte op de snelheid van verouderen verwaarloosbaar is. Wegens het kleine vermogen en de afwezigheid van bewegende delen zijn de mechanische krachten die op de isolatie worden uitgeoefend, gering, zodat deze gedurende een groot deel van de levensduur vrijwel niets tot de afbraak van de isolatie bijdragen. Pas wanneer de structurele samenhang van de isolatie ver is achteruitgegaan, wordt de verdere afbraak door mechanische krachten versneld (hierop komen wij aanstonds nog terug).

Klimatologische invloeden — afgezien van de omgevingstemperatuur — zijn bij transformatoren voor gasontladingslampen alleen in uitzonderingsgevallen van gewicht. Indien men de invloed van vocht en schimmel vreest, is het gebruikelijk, de apparaten te monteren in gesloten kasten en deze zo nodig nog te vullen met een afsluitende gietmassa.

De temperatuur van het isolatiemateriaal blijft dus over als verreweg de belangrijkste grootheid waarvan de snelheid van verouderen afhangt. Dit is niet alleen het geval bij transformatoren voor gasontladingslampen, maar eveneens bij grote groepen van andere transformatoren. Het is dan ook niet verwonderlijk dat talrijke onderzoekingen zijn verricht om meer te weten te komen over de invloed van de temperatuur op de snelheid waarmee de isolatie veroudert.

Lange tijd heeft men gemeend dat er een bepaalde kritische temperatuur was die de grens bepaalde tussen een verwaarloosbaar langzame veroudering en een snelle. Omstreeks 1930 echter heeft Montsinger [1]) aangetoond dat er bij iedere temperatuur veroudering plaatsvindt. Uit zijn proeven volgde een afhankelijkheid van de temperatuur die is voor te stellen door de betrekking

$$L = A\, e^{-BT}, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

waarin L de levensduur, T de temperatuur van de isolatie, en A en B materiaalconstanten zijn. Deze formule levert in een grafische voorstelling met een lineaire temperatuurschaal en een logaritmische levensduurschaal een rechte lijn (*fig. 1*). B bepaalt

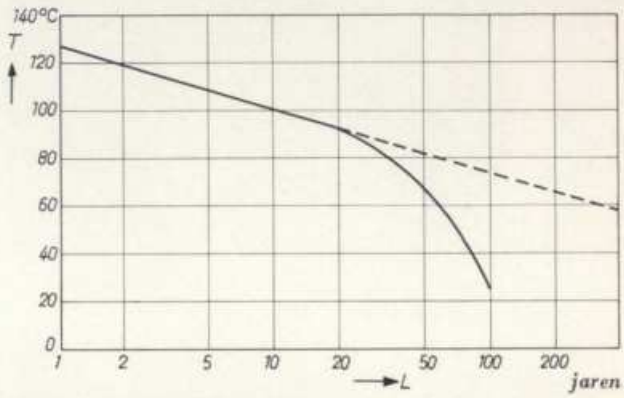


Fig. 1. Invloed van de temperatuur T op de levensduur L van organisch isolatiemateriaal in olie (figuur ontleend aan het in [1]) aangehaalde artikel). De rechte lijn beantwoordt aan verg. (1); het getrokken deel geeft het resultaat van proeven, het gestippelde deel is een extrapolatie naar lagere temperaturen. Montsinger heeft gesuggereerd dat bij lage temperaturen de lijn mogelijk zou afbuigen (getrokken kromme).

de hoek die de lijn met de T-as maakt. Montsinger vond voor B een waarde die overeenkomt met een halvering van de levensduur voor elke 8 °C temperatuurverhoging.

Uit latere onderzoekingen [2]) is gebleken dat de temperatuurstijging die de levensduur halveert, enigszins varieert, ongeveer van 7 tot 10 °C. De geconstateerde verschillen zijn misschien gedeeltelijk toe te schrijven aan verschillen in de onderzochte materialen, maar blijken in ieder geval ook veroorzaakt te worden doordat niet alle proeven in hetzelfde temperatuurgebied zijn gedaan; de grootheid B is namelijk enigszins afhankelijk van de temperatuur.

Op grond van chemische beschouwingen is Büssing [3]), en later ook Dakin [4]), tot een andere formule voor de levensduur gekomen, van deze vorm:

$$L = C\, e^{D/T}. \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Hierin zijn C en D materiaalconstanten, en T is de absolute temperatuur van de isolatie. Verg. (2)

[1]) V. M. Montsinger, Loading transformers by temperature, J. Amer. Inst. Electr. Engrs. **49**, 293-297, 1930.

[2]) Zie o.a. G. L. Moses, Westinghouse Engr. **5**, 106, 1945.

[3]) W. Büssing, Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen, Arch. Elektrotechn. **36**, 333-361, 1942.

[4]) T. W. Dakin, Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs. **67**, 113-122, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

houdt in dat de levensduurlijnen in een grafische voorstelling rechten worden indien L logaritmisch wordt uitgezet en $1/T$ lineair. Inderdaad blijkt deze formule in vele gevallen de resultaten van levensduurproeven goed voor te stellen. Een fraai voorbeeld geeft *fig. 2*.

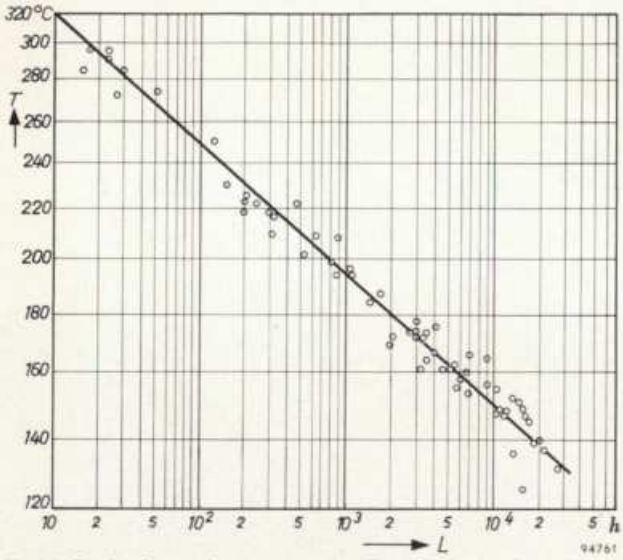


Fig. 2. Invloed van de temperatuur T op de levensduur L van geïmpregneerd asbestpapier (ontleend aan het in [11]) aangehaalde artikel). De lijn beantwoordt aan verg. (2).

Indien men in alle gevallen op de geldigheid van dit verband tussen temperatuur en levensduur kon rekenen, zou het onderzoek van de verschillende materialen en de ermee gefabriceerde produkten eenvoudig zijn. Immers, een proef bij twee temperaturen zou al voldoende zijn om voorspellingen van de levensduur bij elke willekeurige temperatuur mogelijk te maken. Helaas blijken er nog zodanige afwijkingen voor te komen dat men proeven bij een groter aantal temperaturen moet nemen. Dit maakt een aanzienlijk uitgebreider onderzoek noodzakelijk. Een verdere complicatie is dat levensduurproeven aan gerede produkten om praktische of economische redenen niet altijd uitvoerbaar zijn. Men kan dan overwegen, de materialen afzonderlijk te onderzoeken, of de proeven te doen aan vereenvoudigde nabootsingen van de produkten. Wij komen op deze mogelijkheden aanstonds terug.

Keuze van het temperatuurgebied

Welke methode men ook volgt, het is van groot belang dat het temperatuurgebied waarin men de proeven doet, met zorg wordt gekozen.

Het is verleidelijk, de temperaturen hoog te kiezen, omdat men dan snel resultaten krijgt. De hoogste temperatuur die voor de proeven nog bruikbaar is, is bepaald door de tijd die het te onderzoeken produkt nodig heeft om deze temperatuur te bereiken. Tijdens het warm worden treedt namelijk ook al enige veroudering van de isolatie op, doch het is moeilijk te bepalen in welke mate dit gebeurt. Daarom moet de temperatuur zo worden gekozen dat de beproevingsduur lang is in vergelijking met de tijd van opwarmen. Deze overweging leidt voor kleine transformatoren tot een minimumtijd van enige dagen.

De laagste beproevingstemperatuur is bepaald door de nauwkeurigheid die men wil bereiken bij het extrapoleren naar de levensduur bij de normale werktemperatuur. Gezien de dikwijls grote spreiding in de meetresultaten, is het wenselijk dat de laagste temperatuur niet ver boven de werktemperatuur ligt. Van vele transformatoren wordt verlangd dat ze enige tientallen jaren meegaan. Gewoonlijk zijn ze gedurende die tijd niet continu vol belast, maar wisselend of intermitterend belast. De isolatie is dus slechts een gedeelte van de tijd aan de hoogste temperatuur blootgesteld. Daarom is in de meeste gevallen een levensduur van tien jaar bij continue volle belasting voldoende om te maken dat de transformator onder praktische omstandigheden ettelijke tientallen jaren zal meegaan. Om uit de resultaten van levensduurproeven met een redelijke nauwkeurigheid te kunnen extrapoleren naar een tijd van tien jaar, moet men de proeven die het langst lopen, uitvoeren bij een zodanige temperatuur dat ze ongeveer twee jaar duren.

Resumerend kunnen wij dus stellen dat de hoogste en de laagste temperatuur waarbij men de proeven doet, gekozen moeten worden in overeenstemming met een levensduur van enkele dagen resp. enkele jaren.

Levensduurproeven aan incomplete produkten

Tot de methodes waarbij men incomplete produkten onderzoekt, behoren de proeven aan afzonderlijke isolatiematerialen en de proeven aan vereenvoudigde of verkleinde modellen van de te onderzoeken transformatoren. Zoals uit het onderstaande zal blijken, leidt dit soort proeven echter in het algemeen niet tot het gewenste resultaat.

Proeven aan isolatiematerialen afzonderlijk

Het zou grote voordelen bieden indien men kon afgaan op levensduurproeven aan isolatiematerialen afzonderlijk: het verouderen en belasten hiervan tot de doorslaggrens vraagt een veel eenvoudiger apparatuur en is minder kostbaar dan het beproeven van complete transformatoren. In twee opzichten echter heeft een onderzoek aan het materiaal zelf slechts beperkte waarde: ten eerste staat men voor de moeilijk te beantwoorden vraag, welke eigenschap

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van het materiaal de levensduur bepaalt, en ten tweede is het niet duidelijk, in welke mate deze eigenschap in waarde achteruitgegaan mag zijn voordat men de levensduur als geëindigd kan beschouwen.

Aan isolatiepapier b.v. kan men onderzoeken hoe bij verschillende temperaturen eigenschappen zoals de volgende met de tijd veranderen: de doorslagspanning, de trekvastheid, de buigbaarheid, de afmetingen (krimp), enz. Volgens Montsinger [1]) zijn het de mechanische eigenschappen waar het op aankomt, volgens Stewart en Whitman [5]) daarentegen de elektrische (althans bij transformatoren die met lucht, of in het algemeen met een gas, worden gekoeld). Onze eigen proeven wijzen erop dat de elektrische eigenschappen bepalend zijn als de isolatie wordt belast tot dicht bij de doorslagspanning, maar dat bij de meer voorkomende lagere elektrische belastingen (nominale spanning lager dan ca. $\frac{1}{3}$ van de doorslagspanning) vooral de mechanische eigenschappen van belang zijn.

Als men in een bepaald geval weet, welke eigenschap het belangrijkst is, dan blijft het probleem om het criterium voor het eind van de levensduur vast te stellen. Maar zelfs al is ook dit bekend, dan is men nog niet van de moeilijkheden af. In de praktijk namelijk vertoont het isolatiemateriaal in transformatoren tegen het eind van de levensduur een zo sterke mate van afbraak dat het niet meer hanteerbaar is. Dit maakt de experimentele moeilijkheden zeer groot.

Met enige voorbeelden zullen wij deze bezwaren verduidelijken.

In *fig. 3* is getekend hoe blijkens proeven de doorslagspanning van ongeïmpregneerd isolatiekarton afhangt van de verouderingstijd, in lucht van 200 °C. Na omstreeks tien dagen is de doorslagspanning gedaald tot ca. 40% van de beginwaarde. De mechanische eigenschappen zijn dan al dermate achteruitgegaan dat verdere metingen worden bemoeilijkt. Slechts met vele voorzorgen kon de proef tot 20 dagen worden gerekt. De doorslagspanning echter had na deze 20 dagen nog steeds een waarde die in de meeste transformatoren volkomen veilig zou zijn.

Fig. 4 geldt voor een soortgelijke proef, nu echter bij 160 °C. Ook hier is voortzetting van de proef zeer moeilijk wanneer de doorslagspanning lager dan 40% van de beginwaarde is geworden.

In *fig. 5* zijn de gegevens van fig. 3 en fig. 4 gecombineerd: de tijd L_{160} waarin bij 160 °C de

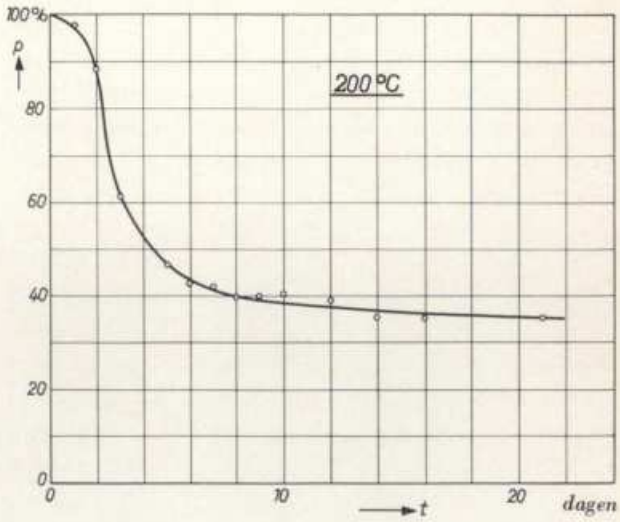


Fig. 3. Relatieve doorslagspanning p (wisselspanning, 50 Hz) van ongeïmpregneerd isolatiekarton van 0,5 mm dikte, in afhankelijkheid van de tijd t gedurende welke het is blootgesteld geweest aan lucht van 200 °C.

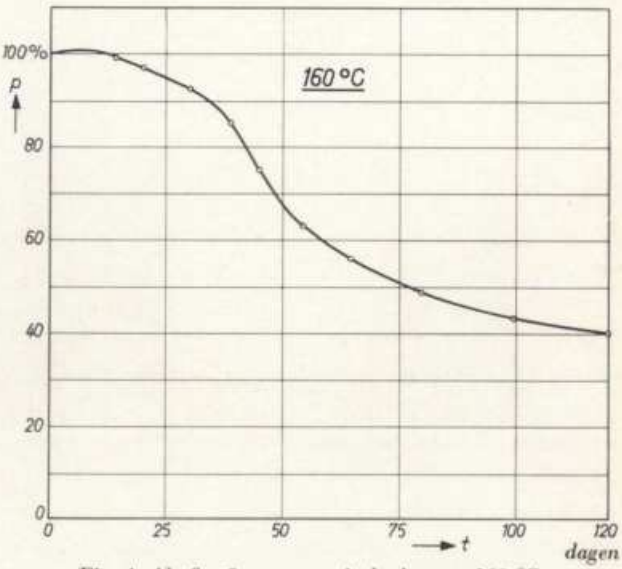


Fig. 4. Als fig. 3, maar nu in lucht van 160 °C.

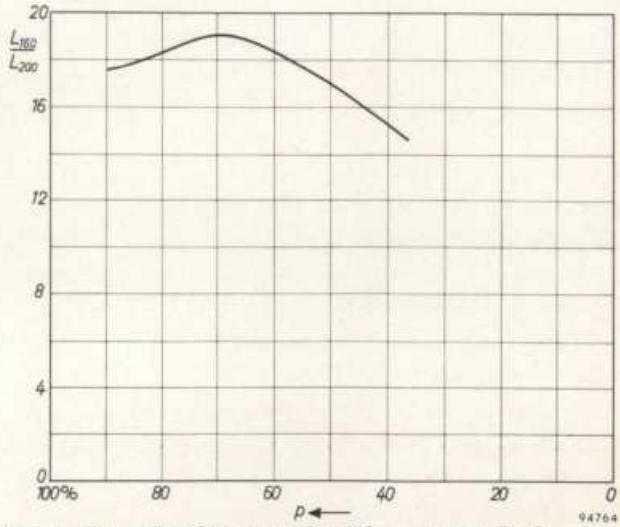


Fig. 5. De verhouding van de tijden waarna de doorslagspanning van het materiaal in fig. 4 en 3 bij 160 °C resp. 200 °C is achteruitgegaan tot een fractie p, als functie van p.

[5]) H. C. Stewart en L. C. Whitman, Aging characteristics of dry-type transformer insulation at high temperature, Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs. **67**, 1600-1607, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

doorslagspanning daalt tot een fractie p van de beginwaarde, is gedeeld door de tijd L_{200} die daarvoor bij 200 °C nodig is, en de verhouding L_{160}/L_{200} is uitgezet als functie van p. Deze verhouding blijkt verre van onafhankelijk van p te zijn. Dit maakt extrapolatie van de gevonden kromme naar b.v. $p = 10\%$ tot een hachelijke zaak.

Als tweede voorbeeld noemen wij proeven met „emaildraad" (koperdraad, geïsoleerd met olielak). Lusjes van dit draad werden eerst op zwakke plekken in de isolatie onderzocht door ze in een zoutwaterbad te dompelen (*fig. 6*) en de isolatie te belasten met 300 V wisselspanning. Na verwijdering van de exemplaren die dit niet uithielden, werden de overige in een oven verouderd. Met tussenpozen werden ze in groepjes van tien uit de oven genomen

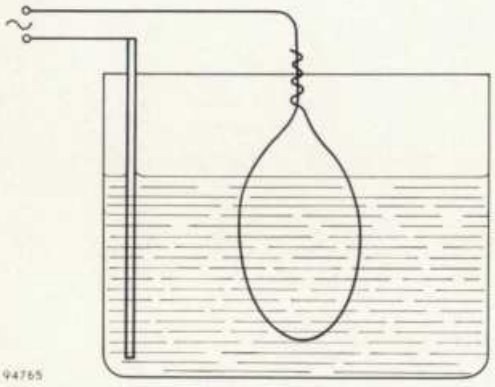


Fig. 6. Meetopstelling voor het koperdraad waarop fig. 7, 8 en 9 betrekking hebben. Tot een lus gebogen draden worden in een zoutwaterbad gehangen en met een langzaam opgevoerde wisselspanning belast tot doorslag.

om in het waterbad op doorslagspanning te worden onderzocht. *Fig. 7* en *fig. 8* geven de gevonden doorslagspanning in afhankelijkheid van de verouderingstijd in lucht van 200 °C resp. 160 °C. De verhouding van de tijden waarin bij elk van deze temperaturen een bepaalde achteruitgang van de doorslagspanning optreedt, is ook hier niet constant (*fig. 9*).

Een derde voorbeeld betreft het gewicht van het isolatiepapier. De gewichtsvermindering vormt een criterium voor de mate van afbraak dat gemakkelijk te bepalen is, ook nog als het materiaal zijn samenhang al verloren heeft. In *fig. 10* is de verhouding van de tijden waarin bij 160 en 200 °C het gewicht tot $p\%$ van de beginwaarde afneemt, als functie van p getekend. De vorm van de gevonden kromme wijkt af zowel van die in fig. 5 als van die in fig. 9.

Uit de gegeven voorbeelden en uit vele andere proeven is het duidelijk geworden dat het nodig is, nauwkeurig te weten, welke eigenschap van het materiaal de levensduur bepaalt en bij welke mate

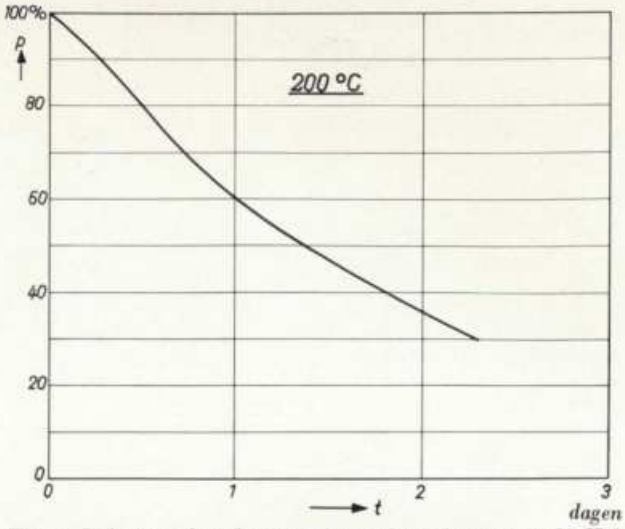


Fig. 7. Relatieve doorslagspanning p (wisselspanning, 50 Hz) van met olielak geïsoleerd koperdraad van 0,4 mm, in afhankelijkheid van de tijd t gedurende welke het is blootgesteld geweest aan lucht van 200 °C.

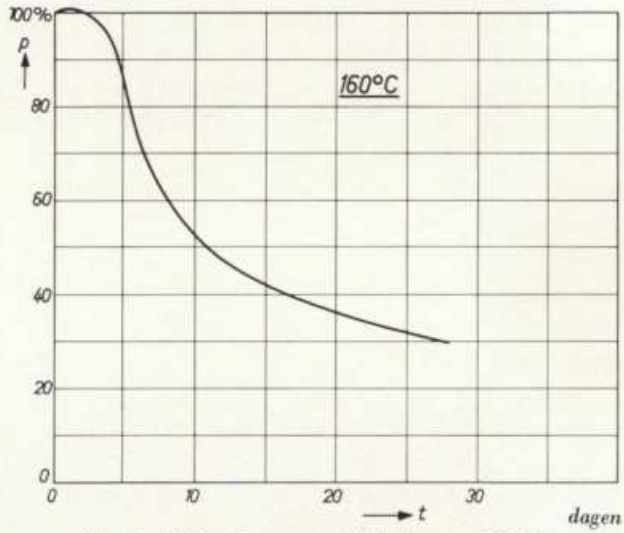


Fig. 8. Als fig. 7, maar nu in lucht van 160 °C.

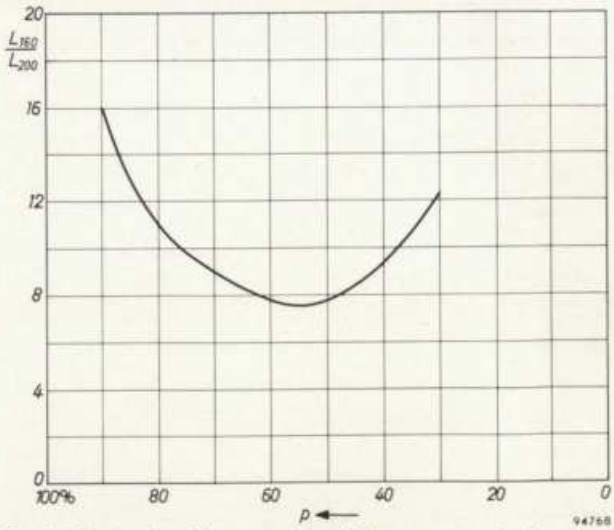


Fig. 9. De verhouding van de tijden waarna de doorslagspanning van de koperdraden van fig. 8 en 7 bij 160 °C resp. 200 °C is achteruitgegaan tot de fractie p, als functie van p.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

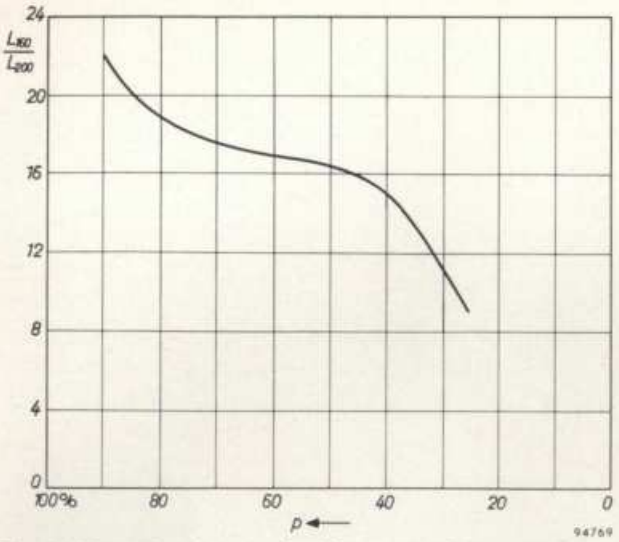


Fig. 10. De verhouding van de tijden waarna het gewicht van isolatiepapier bij 160 °C resp. 200 °C is verminderd tot de fractie p, als functie van p.

van belasting ten aanzien van deze eigenschap het materiaal onder praktijkomstandigheden bezwijkt. Om op betrouwbare wijze de helling van de levensduurlijn (fig. 2) te kunnen vaststellen, moet men het materiaal bij het levensduuronderzoek onderwerpen aan dezelfde belasting als in de praktijk. Kiest men echter zowel de belasting als de nog toelaatbare mate van afbraak betrekkelijk willekeurig, dan kan een geheel andere helling worden gevonden, terwijl ook de plaats ten opzichte van de levensduuras geheel verkeerd kan uitvallen.

Neemt men bovendien nog in aanmerking dat bij materiaalproeven veelal een grote spreiding in de resultaten optreedt, dan blijkt wel dat het trekken van algemene conclusies over de levensduurlijn van het eindprodukt uit materiaalproeven zeer hachelijk is en dat de juistheid van deze conclusies dan ook dikwijls aanvechtbaar zal zijn [3] [6]). Wat deze proeven wèl kunnen geven, is een globale indruk van de prestaties die men van het onderzochte materiaal mag verwachten wanneer het in transformatoren zal zijn verwerkt. Voor de eindcontrole op de bruikbaarheid evenwel zijn betere proeven onmisbaar.

Proeven aan modellen

Omdat proeven met afzonderlijke isolatiematerialen, zoals we gezien hebben, niet tot het gewenste resultaat leiden, en proeven aan complete transformatoren dikwijls te kostbaar zijn, zoekt men wel eens een oplossing door de proeven te doen aan een kleinere, goedkopere, imitatie van de transformator. In dit model moet het isolatiemateriaal zo goed mogelijk in overeenstemming met de werkelijkheid worden verwerkt en belast. Dit laatste kan moeilijkheden opleveren, doordat de condities in het model in het algemeen anders zullen zijn dan in de transformator zelf. De elektrische belasting is gewoonlijk wèl goed te imiteren, de mechanische daarentegen moeilijker: de krachten die als resultaat van de elektrische stromen en de magnetische velden op de windingen werken, kunnen namelijk in het model een heel andere grootte hebben. Een mogelijkheid om de omstandigheden in de werkelijke transformator beter te benaderen, is dan, het model met de juiste amplitude en frequentie te laten trillen [7]). Ook kan men soms het doel bereiken door als model b.v. een losse spoel te gebruiken en deze voor de periodieke beproeving met een losse kern tot een transformator te completeren [8]). Neemt men zulke voorzorgen niet, dan kunnen de uitkomsten van het onderzoek zeer misleidend zijn, zoals door de volgende serie proeven wordt geïllustreerd.

Als nabootsing van smoorspoelen van „TL" lampen zijn een groot aantal modellen vervaardigd, waarvan *fig. 11* de constructie weergeeft. De eerste vier lagen windingen zijn elektrisch gescheiden gehouden van de volgende vier lagen. De isolatie tussen deze twee groepen van lagen bestaat uit

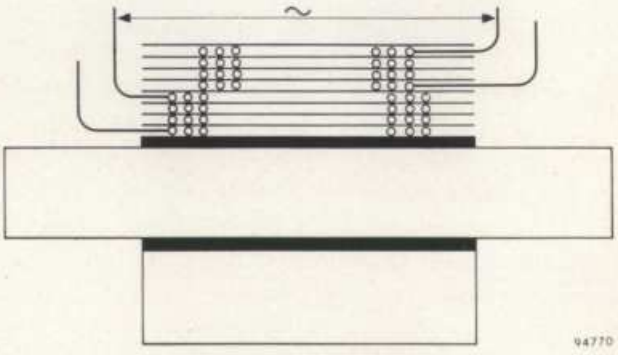


Fig. 11. Doorsnede van spoelen voor modelproeven. Op een koker van isolatiemateriaal zijn twee maal vier lagen „geëmailleerd" koperdraad gewikkeld, met tussenlagen van isolatiepapier. De isolatie tussen de vierde en de vijfde laag werd op doorslag beproefd. In de koker is een rechte ijzerkern aangebracht om deformatie tegen te gaan.

olielak + isolatiepapier + olielak. De doorslagspanning van deze isolatie kon dus bepaald worden zonder dat er stroom door de windingen liep, zodat krachten die als gevolg van stroomdoorgang zouden zijn opgetreden, vermeden werden. De spoelen werden gesteund door de kern en door montageplaten

[6]) J. J. Smith en J. A. Scott, Temperature aging characteristics of class A insulation, Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs. **58**, 435-444, 1939.

[7]) R. E. Whipple, Aging characteristics of electrical insulation, N.R.L. Report 3708, juli 1950.

[8]) J. A. Scott en B. H. Thompson, Temperature-aging tests on classe-A-insulated fractional-horsepower motor stators, Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs. **61**, 499-501, 1942.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

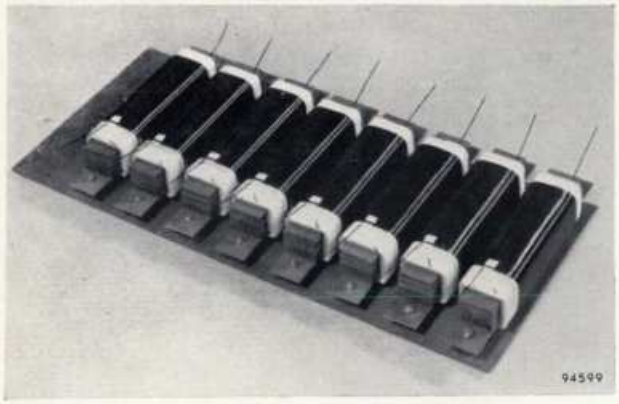


Fig. 12. Onvolledige smoorspoelen, waaraan levensduurproeven zijn genomen met uitsluitend elektrische belasting.

(*fig. 12*). Ze werden zeer voorzichtig behandeld. In afwijking van de toestand bij werkelijke smoorspoelen in voorschakelapparaten, werden de modellen dus vrijwel uitsluitend elektrisch belast.

De resultaten van de doorslagproeven na verschillende verouderingstijden bij 200 °C zijn weergegeven in *fig. 13*. Er zijn hier drie gebieden te onderscheiden: een eerste gebied met zeer snelle daling van de doorslagspanning en grote spreiding in de metingen, een tweede gebied met ongeveer constante doorslagspanning en kleine spreiding, en een derde gebied met opnieuw dalende doorslagspanning en grote spreiding.

In het eerste gebied gaat de isolatie niet alleen elektrisch, maar ook in mechanische eigenschappen en in dikte snel achteruit, maar ze blijft nog intact. In tegenstelling met het volgende, kan men hier spreken van doorslag in het isolatiemateriaal zelf (*fig. 14*).

Bij voortgezette veroudering begint de isolatie te scheuren, waardoor er wegen voor directe overslag van winding tot winding kunnen ontstaan. De doorslagspanning wordt dan vrijwel alleen bepaald door de afstand die overbrugd moet worden, dus door de dikte van de isolatie naast een scheur. Deze dikte neemt slechts langzaam met de tijd af, zodat de doorslagspanning gedurende geruime tijd (het „tweede gebied" in fig. 13) maar weinig daalt.

Bij verder gaande afbraak neemt het aantal scheuren sterk toe, de isolatie valt in steeds kleinere delen uiteen en gaat ten slotte over in gruis. In dit derde gebied zijn — in tegenstelling met de beide vorige — mechanische krachten op de isolatie van grote invloed, want trillingen en schokken voeren de snelheid van het vergruizingsproces op. De tijd gedurende welke men de proeven kan voortzetten, is daardoor mede afhankelijk van de voorzichtigheid die men bij het hanteren van de spoelen in acht

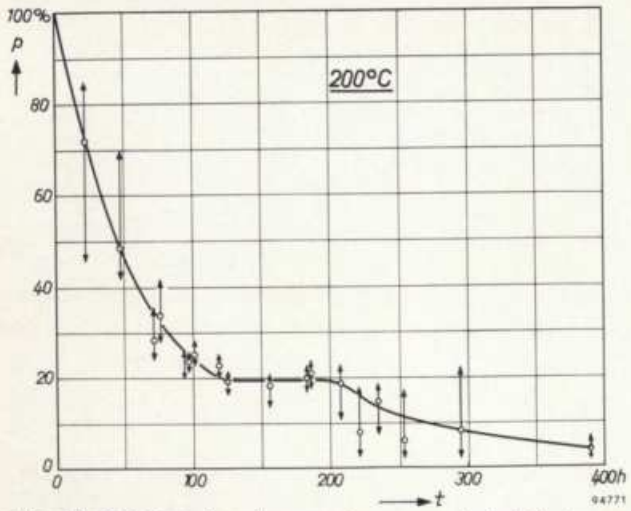


Fig. 13. Relatieve doorslagspanning p van de isolatie tussen twee lagen, in afhankelijkheid van de verouderingstijd t in lucht van 200 °C.

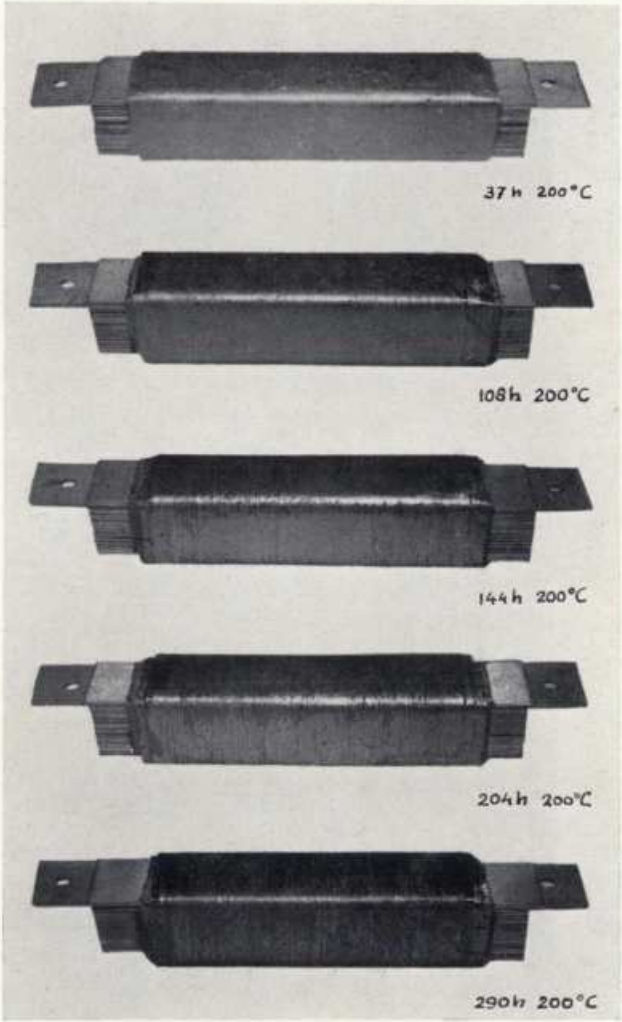


Fig. 14. De smoorspoelen van fig. 12, na resp. 37, 108, 144, 204 en 290 uur elektrisch belast te zijn geweest bij 200 °C. De buitenste vier lagen zijn verwijderd, om de isolatie tussen de vierde en de vijfde laag, die elektrisch wordt beproefd, te laten zien. Na langere verouderingstijden neemt het aantal scheuren toe en ten slotte vergruist de isolatie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

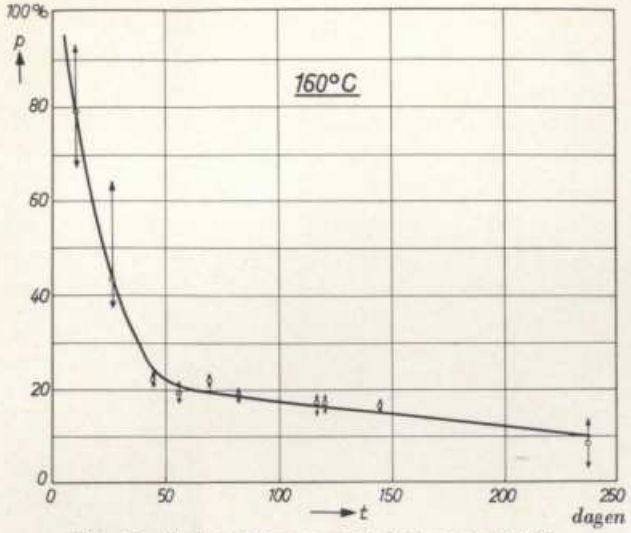


Fig. 15. Als fig. 13, maar nu in lucht van 160 °C.

neemt. De sterke daling van de doorslagspanning bij 200 uur is vermoedelijk het gevolg van mechanische beschadiging die opgetreden is toen de spoelen uit de oven werden genomen voor de spanningsbeproeving.

Overeenkomstige proeven bij 160 °C hebben resultaten geleverd die in *fig. 15* zijn verwerkt. De eerste twee stadia zijn ook hier duidelijk te onderscheiden, het derde was na 200 dagen nog niet bereikt. Zet men weer — zoals in fig. 5, 9 en 10 is gedaan — de verhouding van de tijden waarin bij 160 resp. 200 °C de doorslagspanning tot $p\%$ daalt, als functie van p uit, dan ontstaat de kromme die in *fig. 16* is weergegeven. Ook hier dus geen horizontale rechte, maar een kromme die niet meer dan een globale extrapolatie naar een kleine waarde van p toelaat.

Ook bij proeven aan modellen stuit men dus op de moeilijkheid van het nauwkeurig nabootsen van de

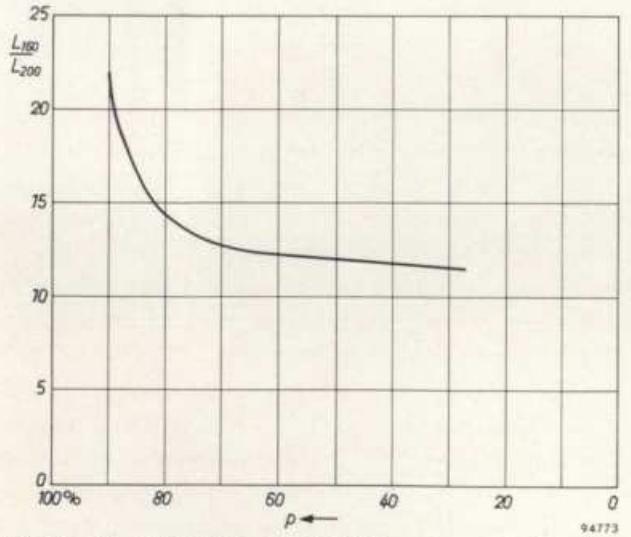


Fig. 16. De verhouding van de tijden waarna de doorslagspanning van de isolaties van fig. 15 en 13 bij 160 °C resp. 200 °C is achteruitgegaan tot de fractie p, als functie van p.

omstandigheden uit de praktijk. Wil men verschillende isolatiesystemen onderling vergelijken door middel van modelproeven, dan is het niet voldoende dat alle proeven onder dezelfde omstandigheden worden gedaan, maar het is ook nodig dat men zorgt voor de juiste omstandigheden [9]).

Levensduurproeven aan complete produkten

Na het voorgaande zal het duidelijk zijn dat levensduurproeven, indien dit economisch ook maar enigszins verantwoord is, moeten worden gedaan aan complete produkten. Economische bezwaren nu zijn er niet in overwegende mate indien het gaat om kleine transformatoren, zoals die van voorschakelapparaten voor gasontladingslampen.

Om de temperatuur van de isolatie hoger te doen worden dan normaal, kan men òf de eigen warmteontwikkeling van de transformator vergroten, òf door middel van een oven warmte van buiten af toevoeren. Hieronder geven wij van beide methodes een voorbeeld. In het eerste is een sterkere warmteontwikkeling verkregen door de stroomdichtheid op te voeren (de proefexemplaren waren daartoe gewikkeld met dunner draad). Het tweede voorbeeld heeft betrekking op smoorspoelen die onbelast in een oven verbleven en alleen eens per dag korte tijd werden ingeschakeld.

Andere manieren om een grotere stroomdichtheid te krijgen, zijn de volgende:

1) Het verhogen van de voedingsspanning. Nadelen hiervan zijn dat door de sterke magnetische verzadiging van de kern de stroom zeer afhankelijk wordt van spanningsschommelingen, en dat de mechanische krachten abnormaal groot zijn.
2) Het aanbrengen of vergroten van luchtspleten in de kern. Ook hierbij zullen in het algemeen de krachten op de isolatie niet de juiste waarde hebben.

Deze nadelen vermijdt men door verwarming in een oven. Ovens van gangbare constructie echter zijn niet berekend op warmteontwikkeling in het te verhitten object zelf. Deze warmte kan namelijk de inwendige temperatuurverdeling ongunstig beïnvloeden, zelfs zo dat de temperatuurregelaar faalt. Deze moeilijkheden vervallen als men de transformatoren in de oven niet (of slechts korte tijd met lange tussenpozen) belast.

Proeven met vergrote stroomdichtheid

Om het gedrag van het isolatiemateriaal te bestuderen dat destijds in de Philips voorschakelapparaten voor „TL" lampen werd gebruikt, hebben wij in 1949 40 smoorspoelen vervaardigd die slechts in twee opzichten afweken van de normale; het betrof hier spoelen voor „TL" lampen van 40 W en voor een netspanning van 220 V (50 Hz). Ten eerste

[9]) L. J. Berberich en T. W. Dakin, Insulation, maart 1956, blz. 21.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

werd de impregnering met asfaltgietmassa achterwege gelaten, ten einde de invloed van verschillende impregneringsmethodes later afzonderlijk te kunnen onderzoeken. Ten tweede waren de 40 spoelen verdeeld in vijf groepen, die elk met draad van een andere dikte waren gewikkeld. De zo verkregen vijf stroomdichtheden hadden tot gevolg dat de isolatie, die normaal ca. 90 °C warm wordt, nu temperaturen van 100 tot 270 °C bereikte, waardoor de gewenste snelle veroudering werd verkregen. Dank zij de geringe dikte van de spoelen was het inwendige temperatuurverval niet noemenswaard. De temperatuur van de isolatie werd afgeleid uit de toeneming van de weerstand der wikkeling en uit de omgevingstemperatuur.

Alle 40 smoorspoelen werden aangesloten op 220 V (50 Hz), d.i. de spanning waarmee ze in de praktijk zijn belast wanneer de „TL" lamp nog door zijn starter is kortgesloten. Met onregelmatige tussenpozen werd de installatie uit- en weer ingeschakeld, om de schakelstoten, die in de praktijk ook voorkomen, niet achterwege te laten.

De resultaten van deze proeven zijn verzameld in *fig. 17*. Het blijkt dat ze goed in overeenstemming zijn met de levensduurformule (2). Na 28 maanden moest de proef wegens een defect in de installatie, waardoor de acht toen nog resterende smoorspoelen werden beschadigd, worden beëindigd. Daar de metingen tijden in de verhouding 1 : 400 bestrijken, is extrapolatie naar 10 jaar toch nog goed mogelijk.

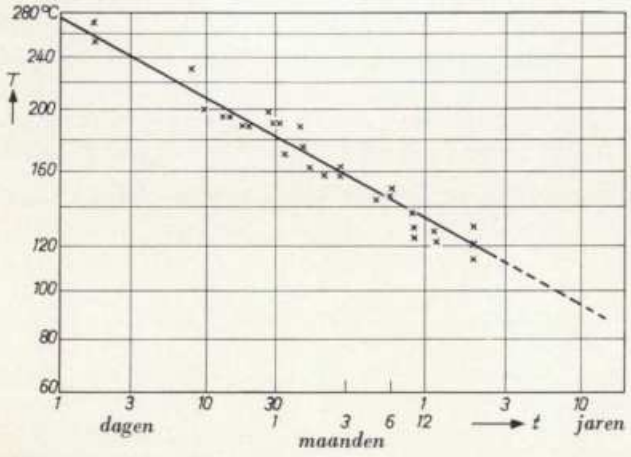


Fig. 17. De levensduur L van ongeïmpregneerde smoorspoelen voor „TL" 40 W, 220 V, 50 Hz, in afhankelijkheid van de isolatietemperatuur T. De verschillende temperaturen zijn verkregen door verschillende stroomdichtheden te gebruiken.

Volgens fig. 17 is de levensduur bij 160 °C slechts ongeveer zes maal zo lang als bij 200 °C. Deze verhouding was nog uit geen enkele van de proeven aan afzonderlijke materialen of aan modellen naar voren gekomen. Dit onderstreept nog eens de beperkte waarde van zulke proeven.

Proeven aan onbelaste smoorspoelen in ovens

In 1956 is begonnen met een herhaling van de proeven van fig. 17. Er werden een groot aantal smoorspoelen vervaardigd — weer voor „TL" 40 W, 220 V, 50 Hz —, maar nu in de uitvoering die op het ogenblik gebruikelijk is. Ze werden in de bijbehorende dozen ingegoten met een vulmassa op polyesterbasis [10]), dus afgewerkt tot een compleet produkt.

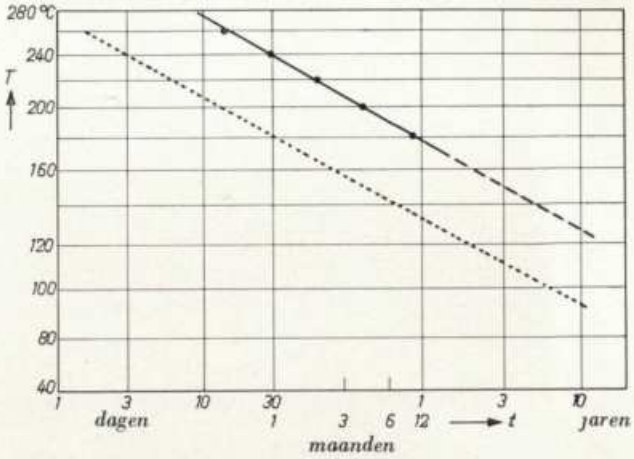


Fig. 18. De levensduur L van smoorspoelen voor „TL" 40 W, 220 V, 50 Hz (in doos met gietmassa op polyesterbasis), als functie van de temperatuur T van de isolatie. De verschillende temperaturen zijn verkregen door middel van ovens. De levensduurlijn van fig. 17 is ter vergelijking gestippeld erin getekend.

De isolatie werd op hoge temperatuur gebracht door de smoorspoelen onbelast in groepen van tien stuks in ovens te plaatsen. Elke dag werd iedere groep één tot twee minuten lang aangesloten op 220 V (50 Hz), in serie met een magnetische schakelaar. De bekrachtigingsspoel van deze schakelaar werd gecommandeerd door een repeterende starter van het type dat voor „TL" lampen van 40 W gebruikelijk is. Bij het sluiten van de schakelaar ontstaan inschakelstroomstoten ter grootte van ongeveer vier maal de normale werkstroom, en bij het opengaan treden spanningsstoten op tot ca. zeven maal de werkspanning. Deze belastingen overtreffen de zwaarste condities uit de praktijk èn in grootte èn in duur dermate dat de afwezigheid van de zoveel lagere werkspanning gedurende de beproevingstijd, naar onze indruk, vrijwel geen invloed meer heeft.

De tot nu toe verkregen uitkomsten leveren punten die goed op een rechte lijn liggen (*fig. 18*), die evenwijdig loopt met de levensduurlijn van fig. 17. Dank zij de betere isolatiematerialen en de opsluiting in polyesterhars is de levensduur bij elke temperatuur tot ongeveer het achtvoudige verlengd.

---

[10]) Th. Hehenkamp, Philips techn. T. **18**, 281, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Levensduur onder praktijkomstandigheden

In fig. 17 en 18 is de levensduur de tijd waarna de helft van het oorspronkelijke aantal smoorspoelen nog intact is. Extrapolatie naar de temperatuur die gewoonlijk in de praktijk voorkomt, levert dus de tijd waarna bij die temperatuur 50% van de smoorspoelen defect zal zijn. Voor de gebruiker echter is dit gegeven minder interessant, hij stelt meer belang in de tijd gedurende welke zich in zijn installatie geen ernstige storingen zullen voordoen. Om deze tijd te kunnen bepalen, moet men de spreiding in de levensduur kennen, dus de uitvalkromme. Hoewel uit de genomen proeven hieromtrent wel iets te voorspellen valt, kunnen betrouwbare getallen pas worden verkregen nadat veel grotere aantallen zijn onderzocht.

Dit nu gebeurt bij Philips door regelmatig steekproeven uit de fabricage van voorschakelapparaten voor „TL", natrium- en HPL-lampen (hogedrukkwiklampen met fluorescerende buitenballon) in een levensduurproef te zetten. Zolang de constructie niet ingrijpend wordt gewijzigd, is het voldoende, deze controle te verrichten bij slechts één temperatuur. Hiervoor is enige jaren geleden 180 °C gekozen.

In de jaren 1953-'56 zijn in totaal bijna 1000 van deze steekproeven genomen. Daaruit is gebleken dat in 30 dagen — dat is volgens fig. 17 de tijd waarin bij 180 °C 50% uitvalt — ongeveer 3% van de apparaten uitvalt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de levensduurlijn van fig. 17 de tijden aangeeft waarna ongeveer 3% van de apparaten in een installatie defect zal zijn. Bij een dergelijke kans op uitvallen komt een installatie langzamerhand in aanmerking voor vervanging.

De overeenkomstige getallen voor de onlangs in produktie genomen „TL" apparaten met polyestervulmassa zijn nog niet bekend. Te verwachten is dat de levensduur op zijn minst verdubbeld zal zijn.

Uit deze gegevens kan voor elke installatie bepaald worden welke temperatuur van de isolatie toelaatbaar is. Men behoeft hiervoor slechts te weten, hoeveel jaar de installatie in betrouwbare toestand moet verkeren en hoeveel uur ze gedurende die tijd in werking zal zijn. Een gewone verlichtingsinstallatie zal b.v. 20 jaar lang gemiddeld 8 uur per dag moeten werken. Omdat de eerste twee uur na het inschakelen de temperatuur van de isolatie de eindwaarde nog niet heeft bereikt, tellen deze uren niet noemenswaard mee en kan men dus, wat de veroudering betreft, rekening houden met gemiddeld zes uur per dag, d.i. een totale verouderingstijd van $^{6}/_{24} \times 20 = 5$ jaar continu.

Voorschakelapparaten zoals ze de laatste jaren werden gefabriceerd, hebben een levensduur van 5 jaar continu als de temperatuur van de isolatie 105 °C is. Bij een omgevingstemperatuur van 35 °C betekent dit dus een temperatuurstijging in de isolatie van 70 °C. Meet men, zoals gebruikelijk is, bij een met 10% verhoogde netspanning, dan mag bij deze meting de temperatuur ca. 80 tot 90 °C stijgen; de meeste voorschriften laten dan echter slechts 70 °C temperatuurstijging toe.

In bijzondere gevallen zal men tot een hogere temperatuur mogen gaan, of tot een minder hoge moeten gaan. Het eerste doet zich voor wanneer men tevreden is met een veel kortere levensduur, zoals bij een etalageverlichting die men, uit reclameoverwegingen, al na enige jaren toch door een nieuwe wil vervangen. Daarentegen moet de temperatuur van de isolatie beneden een lager maximum blijven als de verlichting per etmaal gemiddeld langer brandt dan boven werd aangenomen, terwijl men dezelfde levensduur van de installatie blijft eisen.

Voor de nieuwste apparaten, met polyestervulling, gelden dezelfde beschouwingen — met dien verstande echter dat de temperatuur van de isolatie steeds 10 °C hoger mag zijn (bij 10% overspanning dus 90 tot 100 °C boven de omgevingstemperatuur).

Klasse-indeling van isolatiematerialen

Reeds tientallen jaren is het in nationale en internationale voorschriften gebruikelijk, de verschillende isolatiematerialen in te delen in klassen, en voor elke klasse een bijbehorende maximaal toelaatbare temperatuur voor te schrijven.

Uit het voorgaande zal het duidelijk zijn dat een indeling van de isolatiematerialen in b.v. vier of zes klassen, elk met een maximaal toelaatbare temperatuur, niet anders dan tamelijk willekeurig kan zijn. Er zijn immers vele mogelijkheden om de isolatie van een transformator merkbaar te verbeteren en de levensduur dus te verlengen, zonder dat men overgaat tot materialen uit een hogere klasse. De volgende voorbeelden zullen dit toelichten.

In voorschakelapparaten voor gasontladingslampen wordt veelal koperdraad gebruikt dat geïsoleerd is met een laag olielak. Dit draad valt in een bepaalde isolatieklasse, maar in de praktijk blijkt er een grote variatie in de kwaliteit van de laklaag op te treden, wat aanleiding geeft tot verschillende levensduren. Er bestaan ook synthetische draadisolaties, waarvan de kwaliteit die van goede olielak kan overtreffen. Enkele voorschriften houden hiermee rekening, door voor alle synthetische isolatiematerialen een iets hogere temperatuur toe te staan. Dit is echter niet zonder gevaar, want sommige

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

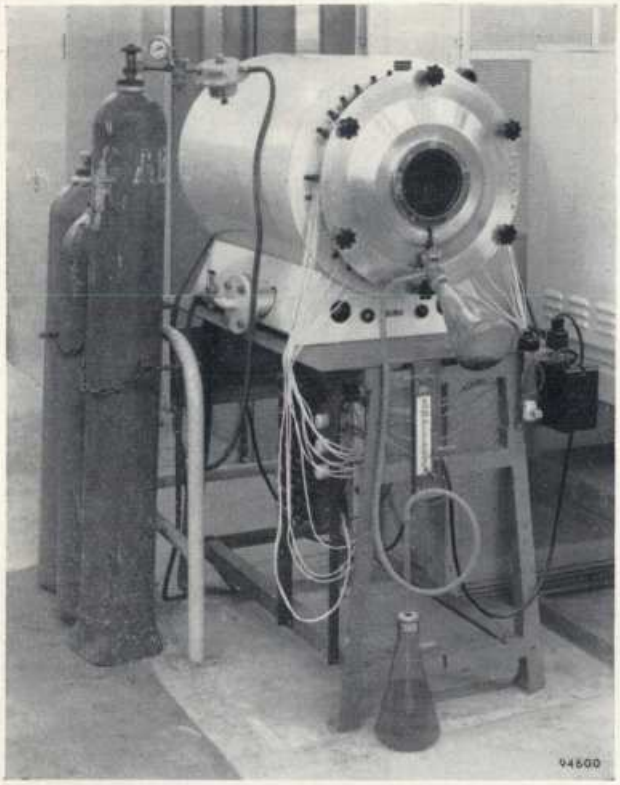


Fig. 19. Oven voor levensduurproeven van transformatoren in een zuurstofvrije atmosfeer.

soorten zijn zelfs nog minder goed dan olielak van matige kwaliteit!

Ten tweede maken wij attent op de invloed van het eventuele gebruik van een gietmassa, die de spoelen afsluit van de omgeving. Het is bekend dat de afbraakprocessen minder snel verlopen bij afwezigheid van zuurstof [11]). Afsluiting van de lucht door een gietmassa zal de levensduur dus verlengen, op voorwaarde natuurlijk dat de gietmassa zelf geen reacties teweegbrengt die het gunstige effect verminderen. Of dit laatste het geval is, kan onderzocht worden door de apparaten in een zuurstofvrije atmosfeer te beproeven met en zonder gietmassa; *fig. 19* toont een voor dit doel geschikte oven. Met minder gunstige gietmassa's constateert men bij deze proef een verkorting van de levensduur.

Neemt men bij deze voorbeelden in aanmerking dat er regelmatig nieuwe isolatiematerialen op de markt verschijnen, die nieuwe mogelijkheden openen, dan is het wel duidelijk dat een indeling in klassen zeer ver moet gaan, wil men de ontwerper niet onnodig belemmeren in het ontwikkelen van een optimaal produkt.

Voor apparaten die zo klein en goedkoop zijn dat het nemen van levensduurproeven geen bezwaar is, verdient het dus aanbeveling, de klasse-indeling globaal als richtsnoer te nemen, en vervolgens de temperatuur die werkelijk nog toelaatbaar is, te bepalen aan de hand van versnelde levensduurproeven. Een aanbeveling in deze richting is al gedaan door Stewart c.s. [11]). In de jongste Duitse voorschriften voor voorschakelapparaten [12]) heeft men zelfs deze stap in feite ook gedaan [13]).

Voor grotere en kostbaarder transformatoren is wellicht langs de weg van proeven aan modellen tot een goed resultaat te komen, al zal daarbij, wegens de mindere betrouwbaarheid van dit soort proeven, de nodige voorzichtigheid betracht moeten worden.

[11]) H. C. Stewart, L. C. Whitman en A. L. Scheideler, Aging evaluation of dry-type transformer insulating systems, Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs. **72-III**, 267-276, 1953.

[12]) VDE 0712, deel 2, april 1957.

[13]) C. H. Sturm, Zur Neuausgabe von VDE 0712 „Zubehör für Leuchtstofflampen", Elektrotechn. Z. **A 78**, 363, 1957 (no. 10).

Samenvatting. De levensduur van een transformator (c.q. smoorspoel) is de tijd die de transformator in werking kan zijn voordat de isolatie bezwijkt. Deze duur is bepaald door de reserve aan isolerend vermogen die aanvankelijk aanwezig was, en door de snelheid waarmee de reserve afneemt. De reserve hangt af van kwaliteit, kwantiteit en wijze van verwerking van de gebruikte isolatiematerialen. Bij transformatoren en smoorspoelen van voorschakelapparaten voor gasontladingslampen is het vooral de temperatuur van de isolatie die de snelheid van verouderen bepaalt. Levensduurproeven kan men versnellen door ze te doen bij hogere temperaturen, b.v. met vergrote stroomdichtheid of in een oven. Men kieze bij deze proeven de temperaturen zodanig dat de kortste levensduur enige dagen bedraagt en de langste enige jaren. Proeven aan afzonderlijke isolatiematerialen of aan modellen hebben slechts beperkte waarde; daarom neme men de proeven, indien het economisch ook maar enigszins verantwoord is, aan het complete produkt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!